

# **INFLUÊNCIA DE REGIMES VARIÁVEIS DE VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO NO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DE EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO SOCIAL**

**MIGUEL NUNO DE QUEIRÓS BOUÇA RIBEIRINHO MACHADO**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES**

---

Orientador: Professor Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos

JUNHO DE 2012

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2011/2012**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2011/2012 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais

*A coisa mais indispensável a um Homem é reconhecer o uso que deve fazer do seu próprio conhecimento.*

*Platão*



## **AGRADECIMENTOS**

A realização de um trabalho desta magnitude envolve direta ou indiretamente várias pessoas às quais pretendo expressar uma palavra de agradecimento, nomeadamente:

Ao meu orientador, Professor Doutor Nuno Ramos, por toda a informação transmitida e todas as sugestões realizadas, pela paciência e pelo apoio incondicional ao longo de todo o desenvolvimento do presente trabalho.

Ao Engenheiro António Curado, não só por me ter disponibilizado o modelo base, mas também por todo o conhecimento transmitido, fundamental no desenrolar do trabalho.

A toda a minha família. Em especial ao meu tio e padrinho, António, por todo o apoio e conhecimento partilhado.

A todos os meus amigos, em primeiro lugar pela amizade demonstrada e em segundo por toda a ajuda e apoio ao longo do meu percurso académico.

A todos que anteriormente foram referidos, e a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização desta dissertação, o mais profundo obrigado.



## **RESUMO**

A ventilação influencia significativamente o comportamento higrotérmico dos edifícios. Na presente dissertação recorreu-se ao programa EnergyPlus, para estudar a influência dos regimes de ventilação variáveis no comportamento higrotérmico de uma habitação, localizada na cidade do Porto.

O programa disponibiliza diversos métodos de cálculo de transferência de calor e humidade, porém para a presente dissertação apenas se utilizam os modelos HAMT e EMPD. Inicialmente calibrou-se o modelo desenvolvido, sujeitando o apartamento a um regime de ventilação constante. Uma vez alcançados valores fiáveis para o modelo desenvolvido, implementou-se um sistema de ventilação multi-zona, através da integração do modelo Airflow Network.

Realizou-se uma análise de sensibilidade ao modelo Airflow Network onde se estuda a influência da área das grelhas, do valor de referência do diferencial de pressão, dos coeficientes de pressão do vento, da permeabilidade das janelas e da abertura das janelas. De seguida, realizou-se uma comparação entre o modelo anteriormente desenvolvido com ventilação constante e o modelo Airflow Network. A comparação dos modelos é realizada analisando parâmetros como a concentração de CO<sub>2</sub>, a temperatura interior, a humidade relativa e as renovações horárias de ar.

Para finalizar realizou-se uma avaliação ao desempenho do apartamento para um conjunto de cenários higrotérmicos. Foram desenvolvidos 9 cenários, para os quais se variam diversos aspetos tais como os horários de ocupação, a ventilação mecânica, a abertura de janelas e o aquecimento recorrendo a um equipamento elétrico.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ventilação, Comportamento Higrotérmico, EnergyPlus, Modelo EMPD, Modelo Airflow Network





## **ABSTRACT**

The ventilation significantly influences the hygrothermal behavior of buildings. In this thesis is used the program EnergyPlus, to study the influence of variable ventilation systems in the hygrothermal behavior of one apartment, located in Porto.

The program offers several methods for calculating heat transfer and moisture, but for this work are used the HAMT e EMPD models. Firstly it was calibrated the model of the apartment, and it was considered a constant ventilation system. After achieving reliable values for the developed model it was implemented a multizone venting system by adding the AirflowNetwork to the previous model.

It was performed a sensitivity analysis to the model Airflow Network, to study the influence of the grids, of the reference pressure differential, of the wind pressure coefficients, of the window permeability and finally of open windows. Then it was executed a comparison between the previously developed model with constant ventilation and the Airflow Network model. The comparison is performed by analyzing parameters as the CO<sub>2</sub> concentration, the indoor temperature, relative humidity and the air changes per hour.

Finally there was an evaluation of the performance of the apartment for a set of hygrothermal scenarios. There were developed nine scenarios with changes in each one of them, the aspects that change are the occupation schedule, the mechanical ventilation, window opening and using one electric heater.

**KEYWORDS:** Ventilation, hygrothermal behaviour, EnergyPlus, EMPD model, AirflowNetwork model.



## **ÍNDICE GERAL**

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. ENQUADRAMENTO .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO .....	2
<b>2. MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DE EDIFÍCIOS</b> .....	5
2.1. MODELAÇÃO COM O PROGRAMA ENERGYPLUS .....	5
2.1.1. INTRODUÇÃO AO PROGRAMA .....	5
2.1.2. BALANÇO DE CALOR .....	6
2.1.3. BALANÇO DE HUMIDADE .....	7
2.1.3. BALANÇO DE DIÓXIDO DE CARBONO .....	8
2.2. MODELOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E HUMIDADE DO ENERGYPLUS .....	9
2.2.1. MODELO CTF .....	9
2.2.2. MODELO EMPD .....	9
2.2.3. MODELO HAMT .....	10
2.3. MODELO DE VENTILAÇÃO AIRFLOW NETWORK .....	10
2.3.1. INTRODUÇÃO .....	10
2.3.2. DESCRIÇÃO DO MODELO .....	11
2.3.3. OPÇÕES DE INPUT .....	15
2.4. CONCEITOS APLICADOS .....	17
2.4.1. CALOR SENSÍVEL E CALOR LATENTE .....	17
2.4.2. COEFICIENTES DE PRESSÃO DO VENTO .....	17
2.4.3. VENTILAÇÃO .....	18
<b>3. DESCRIÇÃO E SIMULAÇÃO DO CASO EM ESTUDO</b> .....	19
3.1. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO .....	19

3.1.1. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO GERAL .....	19
3.1.2. APARTAMENTO EM ESTUDO .....	21
3.1.3. CLIMA.....	23
3.1.4. VENTILAÇÃO .....	24
<b>3.2. SIMULAÇÃO DO CASO DE ESTUDO .....</b>	<b>25</b>
3.2.1. INTRODUÇÃO .....	25
3.2.2. SELEÇÃO DO ALGORITMO.....	25
3.2.3. HORÁRIOS DE OCUPAÇÃO .....	26
3.2.4. CARACTERIZAÇÃO DA HABITAÇÃO .....	26
3.2.5. GANHOS INTERNOS .....	28
3.2.6. AIRFLOW NETWORK .....	30
3.2.6.1. Parâmetros de Simulação .....	30
3.2.6.2. Zonas e Tipos de Ventilação .....	31
3.2.6.3. Implementação dos Extratores.....	34
3.2.6.4. Nós Exteriores e Coeficientes de Vento.....	36
3.2.7. MODELAÇÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO NETWORK.....	37
 <b>4. RESULTADOS GERAIS .....</b>	 <b>39</b>
4.1. INTRODUÇÃO .....	39
<b>4.2. COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E HUMIDADE.....</b>	<b>39</b>
4.2.1. EMPD .....	39
4.2.2. HAMT .....	40
4.2.3. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	41
4.2.3.1. Temperatura Interior.....	41
4.2.3.2. Temperatura Ponto de Orvalho .....	45
<b>4.3. AIRFLOW NETWORK .....</b>	<b>46</b>
4.3.1. APLICAÇÃO DO AIRFLOW NETWORK .....	47
4.3.2. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....	50
4.3.2.1. Área de Abertura das Grelhas.....	50
4.3.2.2. Diferencial de Pressão Valor de Referencia .....	52
4.3.2.3. Efeito da ventilação mecânica.....	53
4.3.2.4. Coeficientes de Pressão do Vento .....	55
4.3.2.5. Permeabilidade das Janelas .....	55

4.3.2.6. Abertura das Janelas .....	58
4.3.3. MODELO AIRFLOW NETWORK VS. VENTILAÇÃO CONSTANTE.....	59
4.3.3.1. Dióxido de Carbono.....	59
4.3.3.2. Produção de Vapor de Água .....	61
4.3.3.3. Temperatura Interior.....	63
4.3.3.4. Humidade Relativa .....	66

## **5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....**

**69**

### **5.1. DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS HIGROTÉRMICOS DESENVOLVIDOS.....**

**69**

### **5.2. ANÁLISE DE PARÂMETROS .....**

**71**

#### 5.2.1. COMPARAÇÃO GERAL DA VENTILAÇÃO.....

**71**

#### 5.2.2. COMPARAÇÃO GERAL DOS NÍVEIS DE CO<sub>2</sub>.....

**72**

#### 5.2.3. COMPARAÇÃO GERAL DA TEMPERATURA INTERIOR .....

**74**

#### 5.2.4. COMPARAÇÃO GERAL DA HUMIDADE RELATIVA .....

**75**

### **5.3. COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS HIGROTÉRMICOS.....**

**76**

#### 5.3.1. COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS 1 E 2 .....

**76**

#### 5.3.2. COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS 1, 3, 4 E 5.....

**77**

#### 5.3.3. COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS 1, 3, 6 E 7 .....

**79**

#### 5.3.4. COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS 1, 3, 8 E 9.....

**80**

### **5.4. SÍNTESE DE RESULTADOS .....**

**83**

## **6. CONCLUSÕES .....**

**85**

### **6.1. CONCLUSÕES GERAIS DO TRABALHO .....**

**85**

### **6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....**

**87**

## **BIBLIOGRAFIA.....**

**89**



## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1 – Zona Térmica de um edifício [adaptado 10].....	5
Fig. 2 - Esquema funcionamento do modelo EMPD .....	10
Fig. 3 - Modelo multi-zona [adaptado de 16].....	12
Fig. 4 - Relação entre os vários campos do Airflow Network .....	16
Fig. 5 - Vista aérea do bairro.....	20
Fig. 6 - Edifício em estudo.....	20
Fig. 7 - Fachada de Sudoeste do edifício em estudo .....	21
Fig. 8 - Planta do apartamento.....	22
Fig. 9 - Temperatura exterior na cidade do Porto para um período de um ano .....	24
Fig. 10 – Janelas e grelhas presentes nos compartimentos principais .....	24
Fig. 11 - Equipamentos mecânicos presentes na habitação .....	25
Fig. 12 - Campo de seleção <i>Schedule Compact</i> .....	26
Fig. 13 - Campo de seleção <i>Zone</i> .....	27
Fig. 14 - Campo de seleção <i>Building Surface Detailed</i> .....	27
Fig. 15 - Planta do apartamento gerada pelo programa .....	28
Fig. 16 - Campo de seleção <i>People</i> .....	28
Fig. 17 - Campo de seleção <i>People</i> .....	29
Fig. 18 - Campo de seleção <i>Schedule Compact</i> .....	29
Fig. 19 - Campo de seleção <i>Airflow Network: Simulation Control</i> .....	31
Fig. 20 - Esquema de ventilação.....	32
Fig. 21 - Campo de seleção <i>Airflow Network: MultiZone Surface</i> .....	32
Fig. 22 - Campo de seleção <i>Airflow Network: Multi Zone Surface Effective Leakage Area</i> .....	33
Fig. 23 - Campo de seleção <i>Airflow Network: Multi Zone Component Detailed Opening</i> .....	34
Fig. 24 - Campo de seleção <i>Fan Zone Exhaust</i> .....	35
Fig. 25 - Campo de seleção <i>Zone HVAC Equipment List</i> .....	35
Fig. 26 - Campo de seleção <i>Zone HVAC Equipment Connections</i> .....	35
Fig. 27 - Campo de seleção <i>Airflow Network: Multi Zone Component Zone Exhaust Fan</i> .....	35
Fig. 28 - de seleção <i>Airflow Network: Multi Zone Reference Crack Conditions</i> .....	36
Fig. 29 - Campo de seleção <i>Airflow Network MultiZone External Node</i> .....	36
Fig. 30 - Campo de seleção <i>Airflow Network Multi Zone Wind Pressure Coefficient Array</i> .....	37
Fig. 31 - Campo de seleção <i>Airflow Network Multi Zone Wind Pressure Coefficient Values</i> .....	37

Fig. 32 - Esquema de distribuição dos coeficientes de pressão do vento para ambas as fachadas do apartamento.....	37
Fig. 33 - Campo de seleção <i>Zone Air Contaminant Balance</i> .....	37
Fig. 34 - Campo de seleção <i>Schedule Compact</i> .....	38
Fig. 35 - Campo de seleção <i>Material</i> .....	39
Fig. 36 - Campo de seleção <i>Material Property Moisture Penetration Depth Settings</i> .....	40
Fig. 37 - Campo de seleção <i>Material Property Heat And Moisture Transfer Settings</i> .....	40
Fig. 38- Campo de seleção <i>Material Property Heat And Moisture Transfer Sorption Isotherm</i> .....	41
Fig. 39 - Análise mensal da $T_{med}$ na zona 2 .....	42
Fig. 40 - Análise mensal da $T_{90}$ na zona 2 .....	42
Fig. 41 - Análise mensal da $T_{med}$ na zona 5 .....	43
Fig. 42 - Análise mensal da $T_{90}$ na zona 5 .....	43
Fig. 43 - Temperaturas registadas entre os dias 10 a 15 de Janeiro para a zona 5 .....	44
Fig. 44 - Análise mensal da $T_{po, med}$ na zona 2 .....	45
Fig. 45 - Análise mensal da $T_{po, 90}$ na zona 2 .....	45
Fig. 46 - Análise às renovações horárias de ar no apartamento.....	48
Fig. 47 - Análise às renovações horárias de ar para cada compartimento da habitação .....	48
Fig. 48 - Esquema dos fluxos de ar predominantes na habitação .....	49
Fig. 49 - Análise às renovações horárias de ar para a zona 4, variando a área das grelhas.....	51
Fig. 50 - Esquema dos sentidos dos fluxos de ar nas grelhas.....	51
Fig. 51 - Análise ao caudal de entrada na grelha do quarto 3 .....	52
Fig. 52 - Análise às renovações horárias de ar para a zona 4, variando o parâmetro $\Delta P_r$ .....	53
Fig. 53 - Análise à concentração de $CO_2$ na zona 4 .....	54
Fig. 54 - Valor médio diário das renovações horárias de ar na habitação .....	55
Fig. 55 - Análise às renovações horárias de ar na zona 4, variando o parâmetro permeabilidade das janelas.....	56
Fig. 56 - Análise à concentração de $CO_2$ no quarto 1 .....	57
Fig. 57 - Análise às renovações horárias de ar no apartamento, variando a abertura das janelas.....	58
Fig. 58 - Análise à concentração de $CO_2$ no quarto 1 .....	59
Fig. 59 - Análise à concentração de $CO_2$ no quarto 2.....	60
Fig. 60 - Análise à concentração de $CO_2$ na sala.....	60
Fig. 61 - Análise à HR na casa de banho.....	61
Fig. 62 - Análise da influência da ventoinha na HR .....	62
Fig. 63 - Análise à HR na cozinha .....	63



Fig. 64 - Análise mensal da $T_{med}$ na casa de banho.....	63
Fig. 65 - Análise mensal da $T_{90}$ na casa de banho .....	64
Fig. 66 - Análise mensal da $T_{med}$ na sala.....	64
Fig. 67 - Análise mensal da $T_{90}$ na sala.....	65
Fig. 68 - Temperaturas registadas entre os dias 15 e 20 de Janeiro para a casa de banho .....	65
Fig. 69 - Análise mensal da HR para a casa de banho .....	66
Fig. 70 - Análise mensal da HR para a sala.....	66
Fig. 71 - Frequência acumulada dos valores de Rph .....	71
Fig. 72 - Análise aos valores médios das renovações horárias de ar na habitação.....	72
Fig. 73 - Frequência acumulada da concentração de $CO_2$ na zona 5 .....	73
Fig. 74 - Análise aos valores médios e P90 da concentração de $CO_2$ na zona 5 .....	73
Fig. 75 - Frequência acumulada dos valores da temperatura na zona 2.....	74
Fig. 76 - Análise aos valores médios da temperatura na zona 2.....	74
Fig. 77 - Frequência acumulada dos valores da humidade relativa na zona 2 .....	75
Fig. 78 - Análise aos valores médios e P90 de HR na zona 5.....	75
Fig. 79 - Análise às $Rph_{med}$ de cada compartimento.....	77
Fig. 80 - Análise às renovações horárias de ar na zona 2.....	78
Fig. 81 - Análise à concentração de $CO_2$ na zona 5 .....	78
Fig. 82 - Análise à concentração de $CO_2$ na zona 5 .....	79
Fig. 83 - Análise à temperatura interior na zona 5 .....	79
Fig. 84 - Análise à pressão parcial de vapor de água para a zona 5.....	80
Fig. 85 - Análise à temperatura na zona 2 durante a primeira semana de Janeiro.....	81
Fig. 86 - Análise à humidade relativa na zona 2.....	81
Fig. 87 - Análise à temperatura e ao consumo energético do aquecedor .....	82



## **ÍNDICE DE TABELAS**

Tabela 1 – Áreas e Volumes dos compartimentos .....	22
Tabela 2 - Horários de ocupação de cada zona .....	23
Tabela 3 - Comparação dos resultados para os parâmetros $T_{med}$ e $T_{po}$ , num quarto .....	46
Tabela 4 - Situações desenvolvidas para estudar influência da área de abertura das grelhas .....	50
Tabela 5 - Situações desenvolvidas para estudar influência da área de abertura nas grelhas, com extração mecânica .....	54
Tabela 6 - Situações desenvolvidas para estudar influência dos coeficientes de pressão do vento. ...	55
Tabela 7 - Horários de ocupação de cada zona .....	70
Tabela 8 – Cenários higrotérmicos desenvolvidos .....	70
Tabela 9 - Valores médios e P90 para os parâmetros temperatura interior e concentração de $CO_2$ , na zona 5.....	76
Tabela 10 - Valores médios da temperatura na zona 2 durante a primeira semana de Janeiro.....	81



## **ABREVIATURAS**

*ANSI* – Approved American National Standard

*ASHRAE* – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

*AVAC* – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

*BLAST* – Building Loads Analysis and System Thermodynamics

*CEN* – European Committee for Standardization

*CTF* – Conduction Transfer Function

*DOE* – Department of Energy

*EMPD* – Effective Moisture Penetration Depth

*EN* – European Norm

*FEUP* – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

*HAMT* – Combined Heat and Moisture Transfer

*RCCTE* – Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios

*TMY* – Typical Meteorological Year

## **SÍMBOLOS**

$A$  – Área [ $\text{m}^2$ ]

$a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  – Coeficientes que relacionam a humidade contida nos materiais com a humidade relativa do ar

$C_i$  – Coeficiente do fluxo do ar [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$C_{\text{CO}_2}$  – Fator multiplicador da capacidade de dióxido de carbono [adimensional];

$C_p$  – Calor específico do material seco [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ]

$C_p^{\text{air}}$  – Calor específico do ar da zona [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ]

$C_T$  – Fator de ponderação da transferência de calor sensível

$C_{\text{sup}}$  – Concentração de dióxido de carbono proveniente do sistema abastecimento de ar [ppm]

$C_w$  – Calor específico da água à temperatura de 20 °C [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ]

$C_{zi}$  – Concentração de dióxido de carbono da zona  $i$  [ppm]

$C_z^t$  – Concentração de dióxido de carbono da zona [ppm]

$C_\infty$  – Concentração de dióxido de carbono no exterior [ppm]

$ELA$  – área da grelha [ $\text{m}^2$ ]

$g$  – aceleração gravítica [ $9.81 \text{ m}/\text{s}^2$ ]

$g_v$  – Fluxo de vapor [ $\text{Kg}/\text{s}$ ]

$h_i$  – Coeficiente de troca de calor [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ]

$h_{mi}$  – Coeficiente de troca de humidade

$h_v$  – Entalpia de evaporação da água [ $\text{J}/\text{kg}$ ]

$HR$  – Humidade relativa [%]

$HR_{int}$  – Humidade relativa do ar interior [%]

$\dot{m}_i$  – Fluxo de ar no nó  $i$  [kg/s]

$\dot{m}_{sys}$  – Caudal do sistema de ventilação [kg/s]

$n$  – Expoente de escoamento [adimensional]

$P$  – Potência [J/s = W]

$P_s$  – Diferença de pressão devido a diferenças de densidade de ar e cota [Pa]

$P_{sat}$  – Pressão de saturação [Pa]

$P_{vap}$  – Pressão parcial de vapor [Pa]

$P_w$  – Diferença de pressão devido à ação do vento [Pa]

$P_{10}$  – Percentil 10 de determinado parâmetro  $P$

$P_{90}$  – Percentil 90 de determinado parâmetro  $P$

$\dot{Q}_i$  – Ganho interno por convecção [W]

$\dot{Q}_{sys}$  – Taxa de troca de calor entre o ar interior da zona e o sistema de climatização [W]

$R_{ph}$  – Taxa horária de renovação de ar [ $h^{-1}$ ]

$R_{ph_{med}}$  – Taxa horárias de renovação de ar [ $h^{-1}$ ]

$T$  – Temperatura [ $^{\circ}C$ ]

$T_{int}$  – Temperatura do ar interior [ $^{\circ}C$ ]

$T_{med,int}$  – Temperatura média interior

$T_o$  – Temperatura da face externa da superfície [ $^{\circ}C$ ]

$T_{po,int}$  – Temperatura ponto de orvalho interior [ $^{\circ}C$ ]

$T_{si}$  – Temperatura das superfícies existentes na zona [K]

$T_z$  – Temperatura da zona [K]

$T_{zi}$  – Temperatura das zonas vizinhas [K]

$T_{\infty}$  – Temperatura do ar infiltrado [K]

$T_{90}$  – Percentil 90 da temperatura do ar [ $^{\circ}C$ ]

$V$  – Volume [ $m^3$ ]

$v(z)$  – Velocidade do ar à cota  $z$  [m/s]

$V_z$  – Volume da zona [ $m^3$ ]

$w$  – pressão dinâmica do vento

$W$  – Teor de humidade do material [ $kg/m^3$ ]

$W_z^t$  – Humidade da zona [ $kg/kg$ ]

$W_{surfaces_i}$  – Humidade das superfícies existentes na zona [ $kg/kg$ ]

$W_{zi}$  – Humidade das zonas vizinhas [ $kg/kg$ ]

$W_{\infty}$  – Humidade do ar infiltrado [ $kg/kg$ ]

$\Delta P_i$  – Diferença de pressão entre os nós [Pa]

$\Delta P_r$  – Valor de referência do diferencial de pressão [Pa]

$\delta_p$  – Coeficientes de pressão do vento

$\delta_M$  – Espessura da camada de adsorção [m]

$\rho_{air}$  – Massa volúmica do ar [kg/m<sup>3</sup>]

$\Delta P$  – Diferença de pressão [Pa]

$\mu$  – Viscosidade do ar [Pa.s]









# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO

Atualmente a cidade do Porto depara-se com graves problemas no âmbito do seu parque habitacional. A origem destes problemas resultou da incapacidade da cidade em dar resposta ao rápido desenvolvimento económico e à forte industrialização sofrida no passado. O resultado deste pico de crescimento da cidade foram fluxos migratórios das zonas rurais para as zonas urbanas por parte da população, provocando uma elevada pressão demográfica na cidade. Atualmente existem no Porto mais de quatro dezenas de bairros de habitação social, que juntamente com as designadas “ilhas”, acomodam mais de 20% da população residente na cidade, tornando-se deste modo o Porto na cidade, em Portugal, com maior percentagem de população a residir em habitações sociais. As habitações sociais da cidade apresentam na sua grande maioria um elevado nível de degradação e muito frequentemente verifica-se falta de condições para os residentes, sendo um dos principais problemas a sobrelotação das habitações. Como justificação para esta carência habitacional salienta-se que grande parte dos edifícios de habitação social são bastante antigos, sendo que mais de metade foram construídos no período anterior ao ano de 1945 e não foram alvos de apropriadas ações de manutenção [1], [2].

Uma exigência para as habitações, hoje em dia, é apresentarem um nível de conforto adequado para os seus residentes. A adequabilidade de um edifício relativamente às exigências dos utilizadores pode ser avaliada através de diversos parâmetros, como a humidade, a temperatura interior e a qualidade do ar. Todos estes parâmetros têm de ser controlados não só por questões de conforto mas principalmente por questões de saúde. O teor de humidade tem de ser cuidadosamente controlado pois quer níveis elevados quer níveis muito reduzidos de humidade são propícios à criação de um ambiente ótimo para o desenvolvimento de bactérias e de fungos, a temperatura deve controlar-se de modo a proporcionar um ambiente confortável e sadio; e dentro da qualidade do ar inserem-se os níveis de concentração de CO<sub>2</sub>, que devem ser mantidos reduzidos por questões de saúde. Todos estes parâmetros estão fortemente dependentes da ventilação existente. A melhor forma de solucionar os problemas higrotérmicos passa por implementar um eficaz sistema de ventilação, onde se assegure um número adequado de renovações horárias de ar. Existe cada vez mais uma preocupação por parte dos projetistas em construir edifícios que apresentem um bom comportamento higrotérmico ao longo da sua vida útil utilizando designadamente soluções passivas. [3], [4].

Para estudar o comportamento higrotérmico de um edifício estão disponíveis diversas ferramentas computacionais. Para a presente dissertação recorreu-se ao programa EnergyPlus, um *software* de índole energética, que permite simular o comportamento de um edifício em regime variável de ventilação. A simulação de regimes de ventilação variáveis, permite desenvolver modelos mais

realistas, não tornando o modelo simulado num modelo estático, onde por simplificação só se consideram valores de renovações de ar por hora constantes. A ventilação variável é controlada quer por fatores meteorológicos quer por equipamentos mecânicos implementados.

Usando as potencialidades do programa realizou-se uma avaliação do desempenho higrotérmico de uma habitação.

## **1.2. OBJETIVOS**

A presente dissertação tem como objetivo a avaliação da influência de regimes variáveis de ventilação e aquecimento no comportamento higrotérmico de edifícios de habitação, usando o programa EnergyPlus como ferramenta base.

De modo a alcançar estes objetivos foram definidos os seguintes objetivos parciais para melhor organizar o desenvolvimento desta dissertação:

- Implementação da modelação disponível no EnergyPlus na simulação higrotérmica de um apartamento T3 em contexto de habitação social;
- Análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados no modelo de ventilação;
- Avaliação do desempenho do apartamento em estudo para um conjunto de cenários higrotérmicos.

## **1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO**

A presente dissertação foi estruturada em seis capítulos.

No Capítulo 1 procede-se à apresentação do enquadramento do tema, definição dos objetivos e indicação da organização do trabalho.

O Capítulo 2 divide-se em quatro partes. Inicialmente são expostos conceitos fundamentais para uma melhor compreensão do trabalho desenvolvido. De seguida é apresentado o programa que serve de ferramenta base para esta dissertação, o EnergyPlus, e é enunciada a metodologia de cálculo usada por este nos balanços de calor, humidade e dióxido de carbono. Na terceira e na quarta parte são apresentados os modelos de transferência de calor e humidade do programa e o modelo AirflowNetwork, respetivamente.

No Capítulo 3 é inicialmente descrito o caso em estudo, que consiste num apartamento, localizado no bairro social de Lordelo. Para além da caracterização total do apartamento e do local onde se insere, também é especificado o clima a que está sujeito bem como ainda são definidos os horários de ocupação. A segunda parte deste capítulo é dedicada à modelação do apartamento no programa de simulação EnergyPlus.

O Capítulo 4 que se encontra dividido em três partes, começa com uma pequena introdução. De seguida realiza-se a comparação entre os dois modelos de transferência de calor e humidade utilizados, sujeitos a um regime de ventilação constante, são eles o EMPD e o HAMT. Para finalizar implementa-se o modelo AirflowNetwork. É realizada uma análise de sensibilidade a alguns parâmetros deste modelo, sendo no final comparado o comportamento higrotérmico do modelo AirflowNetwork com o do modelo de ventilação constante.

No Capítulo 5 são desenvolvidos 9 cenários higrotérmico com o intuito de avaliar o desempenho do apartamento. Inicialmente realiza-se uma comparação geral entre todos os cenários para a ventilação, a concentração de CO<sub>2</sub>, a temperatura interior e a humidade relativa. O capítulo termina com uma comparação pormenorizada de um conjunto de cenários permitindo retirar ilações mais específicas.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do presente trabalho e sugeridos possíveis desenvolvimentos futuros do tema.



## 2

# MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DE EDIFÍCIOS

## 2.1. MODELAÇÃO DE COMPARTIMENTOS COM O PROGRAMA ENERGYPLUS

### 2.1.1. INTRODUÇÃO AO PROGRAMA

No final da década de 70 surge o programa EnergyPlus. Este resulta da combinação das potencialidades de dois outros programas, desenvolvidos pelo Departamento da Energia Norte-Americano, o *BLAST* e o *DOE-2*. Tal como estes programas o EnergyPlus é um programa de simulação energética, que tem como finalidade calcular a carga térmica de um edifício e permite ainda prever a capacidade do consumo de energia do sistema de climatização. Este programa é usado mundialmente devido aos resultados fidedignos que apresenta [8], [9].

O EnergyPlus surge deste modo como uma ferramenta muito útil, em que o utilizador deve caracterizar o mais detalhadamente o edifício, através da inserção de coordenadas dos vértices das estruturas existentes. Através destes dados o programa cria zonas que possuem iguais condições térmicas e representa cada zona através de um nó, homogeneizando as suas características. As trocas de calor realizadas entre o ar interior e a própria zona, bem como os ganhos internos, os ganhos por convecção, a infiltração e extração de ar são os parâmetros que o programa tem em consideração na análise de uma zona. A figura 1 pretende ilustrar o conceito de zona e as trocas que a zona realiza com a envolvente [8].

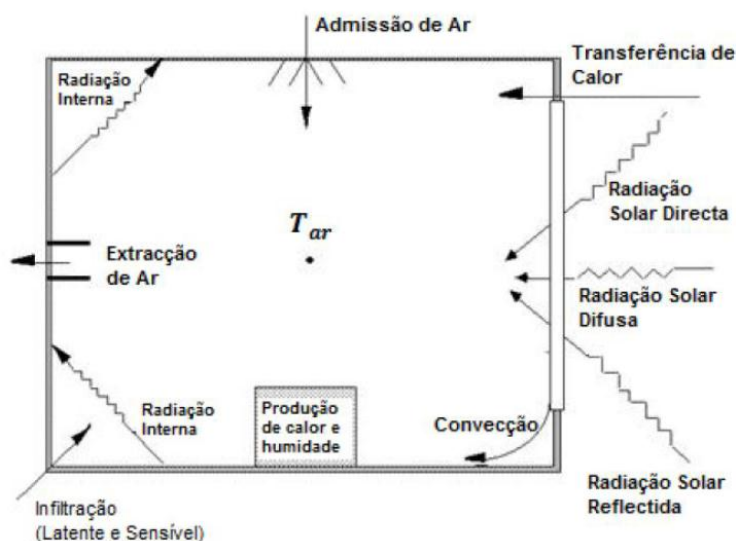


Figura 1 – Zona Térmica de um edifício [adaptado 10].

Outras funcionalidades do programa são: a introdução dos dados climáticos da região em formato TMY, a definição da ocupação de cada zona. Bem como a criação de agendamentos para simular a ocorrência de determinadas atividades, permitindo assim não limitar o caso em estudo a um edifício com uma atividade constante ou sem qualquer tipo de atividade. É ainda possível a introdução de sistemas AVAC bem como o seu controle. O programa usa um método iterativo para cálculo dos resultados, e tem a capacidade de proporcionar a saída dos dados desde intervalos de quinze em quinze minutos até a saída de dados anualmente. [11]

Para melhor compreensão dos resultados deste trabalho, que provêm da simulação realizada pelo programa, descreve-se, de seguida, a metodologia de cálculo base usada para a modelação dos processos utilizados no âmbito desta dissertação. Nesta ordem de ideias, apresentam-se os modelos matemáticos usados pelo EnergyPlus para determinar os balanços de calor, de humidade, de dióxido de carbono, bem como avaliar um dos modelos de ventilação disponível no programa.

### 2.1.2. BALANÇO DE CALOR

O cálculo da temperatura interior é efetuado com base num balanço energético, onde são incluídas as componentes que traduzem as trocas de calor com a zona em estudo. Assim sendo, a equação que traduz o balanço de calor toma a seguinte forma [12]:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p^{air} (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p^{air} (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (1)$$

Onde:

$$C_z = \rho_{air} C_p^{air} C_T;$$

$\rho_{air}$  – massa volúmica do ar [kg/m<sup>3</sup>];

$C_p^{air}$  – calor específico do ar da zona [J/kg.K];

$C_T$  – fator de ponderação da transferência de calor sensível [K/m<sup>3</sup>];

$C_z \frac{dT_z}{dt}$  – energia total armazenada no ar interior da zona;

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$  – soma dos ganhos internos por convecção [W];

$\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$  – transferência de calor por convecção originária das superfícies existentes na zona;

$\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p^{air} (T_{zi} - T_z)$  – transferência de calor devido à mistura de ar de diferentes zonas [W];

$\dot{m}_{inf} C_p^{air} (T_{\infty} - T_z)$  – transferência de calor devido à infiltração de ar exterior [W];

$\dot{Q}_{sys}$  – taxa de troca de calor entre o ar interior da zona e o sistema de climatização [W];

$T_z$  – temperatura da zona [K];

$T_{zi}$  – temperatura das zonas vizinhas [K];

$T_{\infty}$  – temperatura do ar infiltrado [K];

$T_{si}$  – temperatura das superfícies existentes na zona [K];



$h_i$  – coeficiente de troca de calor [ $\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$ ];

$A_i$  – área superficial [ $\text{m}^2$ ];

### 2.1.3. BALANÇO DE HUMIDADE

A humidade relativa interior é um importante parâmetro ao nível do desempenho higrotérmico de um edifício. O cálculo deste parâmetro é bastante complexo pois exige um elevado grau de conhecimento da geometria da zona e das propriedades de todos os materiais existentes, pois não só os materiais de construção o afetam mas também a mobília, os tapetes e até os livros, ou seja, todo o material com um valor higroscópico significativo condiciona o valor deste parâmetro [12].

Porém, normalmente, realizam-se simplificações para o seu cálculo devido à dificuldade em possuir toda a informação atrás referida. O EnergyPlus para efetuar o cálculo da variação da humidade numa zona, realiza um balanço entre diferentes fluxos, como se pode constatar na equação que se segue [12]:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{air}} V_z C_w \frac{dW_z}{dt} = & \sum_{i=1}^{N_{\text{si}}} k g_{\text{mass}} \sum_{i=1}^{N_{\text{surfaces}}} A_i h_{\text{mi}} \rho_{\text{air}} (W_{\text{surfaces}_i} - W_z^t) + \sum_{i=1}^{N_{\text{zones}}} \dot{m}_i (W_{zi} - W_z^t) + \dot{m}_{\text{inf}} (W_{\infty} - W_z^t) \\ & + \dot{m}_{\text{sys}} (W_{\text{sup}} - W_z^t) \end{aligned} \quad (2)$$

Onde,

$\rho_{\text{air}} V_z C_w \frac{dW_z}{dt}$  – consiste na variação de humidade do ar na zona;

$V_z$  – volume da zona [ $\text{m}^3$ ];

$C_w$  – calor específico da água à temperatura de 20 C [ $\text{J}/(\text{kg}.\text{K})$ ]

$\sum_{i=1}^{N_{\text{si}}} k g_{\text{mass}}$  – consiste na quantidade, em massa, de vapor de água produzida na zona [kg];

$\sum_{i=1}^{N_{\text{surfaces}}} A_i h_{\text{mi}} \rho_{\text{air}} (W_{\text{surfaces}_i} - W_z^t)$  – consiste na transferência de vapor de água por convecção, entre o ar e a superfície das paredes;

$A_i$  – área superficial [ $\text{m}^2$ ];

$h_{\text{mi}}$  – coeficiente de troca de humidade

$W_z^t$  – humidade da zona [kg/kg];

$W_{\text{surfaces}_i}$  – humidade das superfícies existentes na zona [kg/kg];

$W_{zi}$  – humidade das zonas vizinhas [kg/kg];

$W_{\infty}$  – humidade do ar infiltrado [kg/kg]

$\sum_{i=1}^{N_{\text{zones}}} \dot{m}_i (W_{zi} - W_z^t)$  – consiste na troca de vapor de água entre as diversas zonas;

$\dot{m}_{\text{inf}} (W_{\infty} - W_z^t)$  – consiste nos ganhos/perdas de vapor de água por infiltração;

$\dot{m}_{\text{sys}} (W_{\text{sup}} - W_z^t)$  – consiste na adição/remoção de vapor de água pelo sistema AVAC;

#### 2.1.4. BALANÇO DE DIÓXIDO DE CARBONO

A qualidade do ar é um aspeto importante para os residentes de qualquer habitação. Estudos realizados no Reino Unido mostram que diversos edifícios escolares existentes não possuem os níveis de ventilação recomendados, o que compromete os níveis de dióxido de carbono presente nas salas de aula, tornando-os excessivos. Este excesso origina uma redução no grau de concentração e performance de trabalho por parte dos alunos, inviabilizando deste modo o alcance de um ótimo nível de aprendizagem. Segundo o mesmo estudo a concentração de dióxido de carbono aconselhada para uma sala de aula não deve exceder as 1000 partes por milhão (ppm) [13]. Utilizando este valor como referencia, realizou-se um estudo dos níveis de CO<sub>2</sub> nos compartimentos considerados mais críticos.

Para calcular os níveis de CO<sub>2</sub> o EnergyPlus parte da seguinte equação de balanço [12]:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{air}} * V_z * C_{\text{CO}_2} \frac{dC_z^t}{dt} = \\ = \sum_{i=1}^{N_{\text{sl}}} \text{kg}_{\text{mass}_{\text{sched load}}} * 10^6 + \sum_{i=1}^{N_{\text{zones}}} \dot{m}_i * (C_{zi} - C_z^t) + \dot{m}_{\text{inf}} * (C_{\infty} - C_z^t) + \dot{m}_{\text{sys}} * (C_{\text{sup}} - C_z^t) \end{aligned} \quad (3)$$

Em que,

$\sum_{i=1}^{N_{\text{sl}}} \text{kg}_{\text{mass}_{\text{sched load}}}$  – soma da produção interna de dióxido de carbono [ppm];

$\sum_{i=1}^{N_{\text{zones}}} \dot{m}_i * (C_{zi} - C_z^t)$  – dióxido de carbono resultante das trocas de ar entre zonas [ppm.kg/s];

$C_{zi}$  – concentração de dióxido de carbono da zona i [ppm];

$C_z^t$  – concentração de dióxido de carbono da zona [ppm];

$\dot{m}_{\text{inf}} * (C_{\infty} - C_z^t)$  – dióxido de carbono transferido devido a infiltração e ventilação de ar proveniente do exterior [ppm.kg/s];

$C_{\infty}$  – concentração de dióxido de carbono no exterior [ppm];

$\dot{m}_{\text{sys}} * (C_{\text{sup}} - C_z^t)$  – dióxido carbono transferido devido a sistemas de abastecimento mecânico de ar [ppm.kg/s];

$C_{\text{sup}}$  – concentração de dióxido de carbono proveniente do sistema abastecimento de ar [ppm];

$\dot{m}_{\text{sys}}$  – caudal do sistema de ventilação [kg/s];

$\rho_{\text{air}} * V_z * \frac{dC_z^t}{dt}$  – dióxido de carbono armazenado na zona;

$C_z^t$  – concentração de dióxido de carbono na zona [ppm];

$\rho_{\text{air}}$  – densidade do ar [kg/m<sup>3</sup>];

$V_z$  – volume da zona [m<sup>3</sup>];

$C_{\text{CO}_2}$  – fator multiplicador da capacidade de dióxido de carbono [adimensional];

## 2.2. MODELOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E HUMIDADE DO ENERGYPLUS

Os modelos fornecidos pelo programa EnergyPlus para calcular os parâmetros previamente referidos são:

- Modelo CTF – *Conduction Transfer Function*
- Modelo EMPD – *Effective Moisture Penetration Deph*
- Modelo HAMT – *Combined Heat and Moisture Transfer*

Segue-se uma breve explicação da metodologia de funcionamento de cada modelo, encontrando-se os modelos matemáticos presentes, de forma detalhada, no manual do programa documento *Engineering Reference*.

### 2.2.1. MODELO CTF

Este é o modelo usualmente mais utilizado para simular a transferência de calor através da envolvente opaca. Ele recorre a algumas simplificações em relação aos restantes modelos referidos, pelo que os resultados obtidos não têm o mesmo grau de exatidão.

Na simulação realizada pelo CTF despreza-se o armazenamento e a difusão de vapor nos elementos de construção, não se considerando portanto as transferências de calor latente, nem a adsorção da humidade do ar por parte dos materiais presentes numa zona.

A simplificação utilizada tem a vantagem de tornar possível o cálculo da transferência de calor por condução através de qualquer elemento construtivo. Obviamente que esta simplificação acarreta desvantagens tais como a impossibilidade de considerar as propriedades térmicas dependentes da temperatura, ou seja, não é possível estabelecer o valor da entalpia de mudança de fase ou a variação da condutibilidade térmica com a temperatura, outra desvantagem é o impedimento, devido à ligação da face externa para a face interna realizada pelo modelo, da quantificação da temperatura das superfícies interiores da envolvente [11], [12].

### 2.2.2. MODELO EMPD

No modelo *Effective Moisture Penetration Deph*, abreviado através das siglas EMPD, é efetuada uma abordagem um pouco mais complexa, para simular a adsorção e a desadsorção de vapor de água pelas superfícies de uma zona. É apenas considerada a existência de uma fina camada, localizada na superfície da parede interior, que realiza trocas de vapor de água com o ar interior. A consequência desta consideração é que a difusão de vapor de água entre o exterior e o interior, através das paredes, é desprezada. A fina camada adsorve e liberta humidade para o compartimento interior quando exposta a variações de humidade no ar [12], [14].

O esquema presente na figura 2 pretende representar a ideia base do modelo EMPD, onde é apenas considerada uma fina camada do lado interior que efetua trocas de vapor de água com o interior.

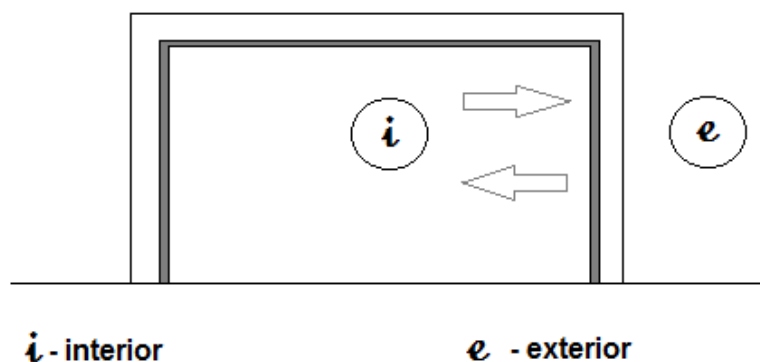


Figura 2 – Esquema funcionamento do modelo EMPD.

Os resultados das simulações realizadas pelo modelo EMPD são bastante reais para curtos períodos de tempo, nas situações em que as variações de humidade são reduzidas e a adsorção/desadsorção da camada fina seja pouco significativa [14].

### 2.2.3. MODELO HAMT

De todos os modelos presentes no programa, o modelo *Combined Heat and Moisture Transfer* é o mais rigoroso e complexo. Não é de estranhar portanto, que para a sua utilização seja exigida maior quantidade de dados, ou seja, é necessário um conhecimento mais detalhado das propriedades dos materiais existentes no edifício em estudo [11].

É um modelo unidimensional que conjuga os efeitos da transferência de calor e humidade através dos materiais de construção implementados. Os materiais são divididos em células ao longo da sua espessura. Cada célula é composta por um único material e situa-se no interior da respetiva camada. Assim sendo cada elemento construtivo é dividido em várias células, sendo estas distribuídas automaticamente pelas camadas de modo a que nas interfaces entre camadas, o número de células presentes seja superior [11], [12].

Este modo de operar por parte do programa, permite determinar variáveis como a temperatura, a humidade relativa e o teor de humidade nas camadas, admitindo uma interação entre estes parâmetros higrotérmicos.

Para que a simulação possa ocorrer, como já foi referido anteriormente, é necessário introduzir uma vasta gama de propriedades dos materiais no EnergyPlus, tais como: a porosidade, o teor de humidade inicial, a curva de retenção de humidade, o coeficiente de transferência de água líquida por sucção, o coeficiente de transferência de água líquida de redistribuição, o fator de resistência à difusão de vapor e a condutibilidade térmica [12].

## 2.3. MODELO DE VENTILAÇÃO AIRFLOWNETWORK

### 2.3.1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes objetivos desta dissertação é a implementação, numa habitação, de um tipo de ventilação mais próxima da realidade. O programa EnergyPlus permite adicionar tipos de ventilação constantes para todas as divisões do edifício, bastando especificar o valor de renovações de ar por hora pretendidas. Porém este modo de atuar consiste numa simplificação do que sucede na vida real. Surge

então o modelo AirflowNetwork que permite a introdução de um modelo de ventilação multi-zona em que cada zona possuirá um tipo de ventilação próprio admitindo também uma interação entre o fluxo de ar das diversas zonas [15].

Nas últimas décadas foram desenvolvidos vários modelos de simulação de ventilação. O National Institute of Standards and Technology (NIST) desenvolveu o programa AIRNET para prever ventilação em edifícios [15].

Um grupo de investigadores do Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) desenvolveu o programa COMIS, com semelhantes capacidades ao programa anteriormente referido. Ambos os programas têm em consideração a influência da temperatura para entrada e saída entre zonas e entre interior e exterior. Ambos assumem a variação linear da densidade do ar com a altura, permitindo por este facto, considerar entrada e saída de ar simultaneamente por uma abertura vertical de grandes dimensões [8], [15].

Dada a importância de ter em conta as várias interações, quando se está a modelar a ventilação em edifícios, uma versão inicial do EnergyPlus foi interligada com o programa COMIS. Esta ligação era usada sobretudo para o cálculo de caudais de ventilação entre as diversas zonas do edifício, com base no efeito do vento. No seguimento desta ligação implementou-se um sistema de distribuição de ar (ADS – *Air System Distribution*) no EnergyPlus, que usava equações provenientes do AIRNET, com o intuito de calcular os caudais de ventilação de um sistema de distribuição de ar e para calcular as perdas energéticas devido ao aquecimento de condutas e infiltrações através da envolvente [15].

De forma a melhor integrar os cálculos dos caudais de ventilação no EnergyPlus o modelo AirflowNetwork foi implementado. Este modelo veio substituir a ligação com o programa COMIS e o sistema ADS que usava as potencialidades do AIRNET. Para além das capacidades dos modelos anteriores, o AirflowNetwork permite ainda a inserção de um sistema AVAC e o seu controle. Este facto possibilita que o cálculo dos caudais de ventilação nas diversas zonas esteja sincronizado com o funcionamento de um sistema AVAC, potencializando assim a possibilidade de implementar a simulação de ventilação híbrida num edifício [15].

O modelo AirflowNetwork foi validado pelo Oak Ridge National Laboratory (ORNL) e pelo Florida Solar Energy Center (FSEC), através de medições de dados “*in situ*” e comparação com os resultados computacionais obtidos. A fiabilidade do modelo ficou deste modo provada, devido à semelhança entre as medições e os resultados do programa [15].

### 2.3.2. DESCRIÇÃO DO MODELO

Existem quatro tipos de aproximações para a descrição dos fluxos de ar para o caso da ventilação em edifícios [16]:

- Modelos empíricos
- Modelos multi-zona
- Modelos zonais
- Modelos CDF (*Computational Fluid Dynamics models*)

Para a presente dissertação apenas tem relevância desenvolver o conceito de ventilação multi-zona, pois é o modelo aplicado nas simulações realizadas. Num modelo com ventilação multi-zona, um edifício é representado por uma malha formada por um conjunto de nós, estes nós representam quer as zonas interiores a simular quer o ambiente exterior. A interação entre as diversas zonas é realizada

através de ligações entre os referidos nós criados neste tipo de modelo. Assim, os compartimentos do edifício são representados por nós e as aberturas são representadas por caminhos de ligação dos fluxos de ar, como se pode constatar na figura 3. É ainda de salientar que todos os nós, quer os interiores quer os exteriores, possuem uma pressão associada [12].

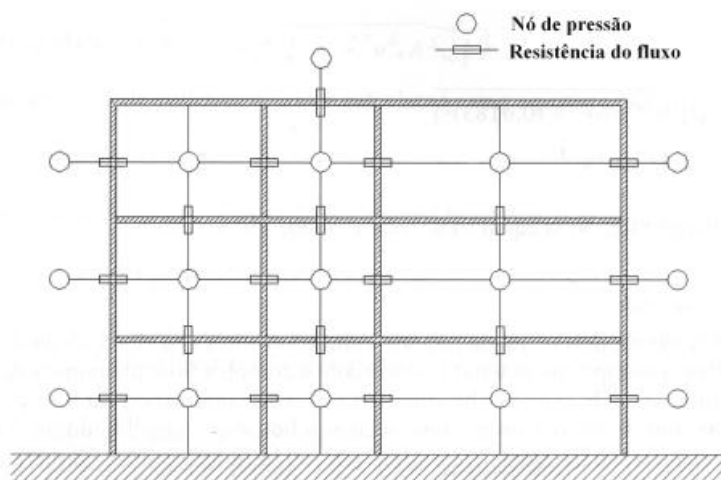


Figura 3 – Modelo multi-zona [adaptado de 16].

Conhecendo o valor das pressões exteriores, através deste modelo são calculadas as pressões para os nós interiores, com a finalidade de se poder calcular o valor dos caudais.

De acordo com o modelo ventilação multi-zona um edifício com  $n$  zonas é representado por uma malha de  $n$  nós de pressão, para além de um nó existente por cada ligação ao exterior. Os nós situados nas zonas que possuem ligações para o exterior, unem-se diretamente aos nós existentes no exterior; por sua vez, os restantes nós ligam-se somente a nós interiores. As ligações entre nós com o exterior representam a existência de janelas, de portas ou de frinchas [16].

Os principais dados de entrada para este modelo são:

- As condições atmosféricas (temperatura e velocidade do vento);
- A temperatura interior para cada zona;
- As dimensões de todas as zonas;
- As áreas, as cotas, e ainda o valor dos coeficientes fundamentais para as aberturas existentes.

O modelo AirflowNetwork possibilita realizar simulações num sistema com distribuição de ar, e incluir nestas simulações aberturas por onde ocorrem trocas de ar com o exterior. Permite calcular caudais com base num modelo de ventilação multi-zona incluindo a ação do vento e permite o funcionamento em simultâneo com um sistema AVAC. A informação relativamente à ação do vento situa-se no ficheiro meteorológico, com origem numa base de dados fornecida pelo programa no seu próprio site [12], [15].

O modelo AirflowNetwork consiste em três passos sequenciais:

1. Cálculo de pressões e caudais de ventilação;
2. Cálculo da temperatura e humidade nos nós;
3. Cálculo do calor sensível e do calor latente.

Os valores das pressões e dos caudais de ventilação são determinados pelo programa para cada nó, sendo posteriormente realizada uma relação entre os nós, uma vez que se está a aplicar o modelo de ventilação multi-zona. Com base no cálculo dos caudais de ventilação para a cadeia de nós sucessivos são determinados, de seguida, os valores da temperatura e humidade de cada zona térmica. Estes dados permitem que o programa calcule depois o calor sensível e calor latente.

Desenvolve-se de seguida a metodologia de cálculo para o primeiro passo por ser o mais complexo e também o de maior relevância para o caso em estudo. Para avaliar as pressões do ar em cada nó é usado o método de Newton, e é requerido um conjunto inicial de valores para as pressões iniciais nos nós. O programa possui dois métodos de inicialização: o primeiro consiste numa aproximação linear a esses valores em regime laminar, enquanto o segundo assume que a pressão inicial é zero e usa diretamente o método de Newton. A primeira opção é a mais correta e por norma a utilizada [12].

Deste modo surge a fórmula que permite determinar o fluxo do ar entre zonas [12]:

$$\dot{m}_i = C_i \rho \frac{\Delta P_i}{\mu} \quad (4)$$

Em que,

$\dot{m}_i$  – fluxo de ar no nó  $i$  [kg/s];

$C_i$  – coeficiente do fluxo do ar;

$\Delta P_i$  – diferença de pressão entre os nós [Pa];

$\mu$  – viscosidade do ar [Pa.s];

O programa realiza ligações entre os diversos tipos de componentes (paredes, equipamentos). Estas ligações são constituídas por dois tipos de nós os *inlet node* e os *outlet node*. A ligação destes nós realiza-se por uma componente que relaciona o fluxo de ar e as pressões, que tem como base a equação de Bernoulli como se pode constatar pelas fórmulas seguintes [12].

$$\Delta P = \left( P_n + \frac{\rho V_n^2}{2} \right) - \left( P_m + \frac{\rho V_m^2}{2} \right) + \rho g(z_n - z_m) \quad (5)$$

Onde,

$\Delta P$  – diferença de pressão entre os nós  $n$  e  $m$  [Pa];

$P_n, P_m$  – pressão estática de entrada e saída [Pa];

$V_n, V_m$  – velocidade de entrada e saída do fluxo de ar [m/s];

$\rho$  – densidade do ar [kg/m<sup>3</sup>];

$g$  – aceleração gravítica [9.81 m/s<sup>2</sup>];

$z_n, z_m$  – cota de entrada e saída [m];

Adicionando o fator pressão do vento, a equação anterior pode ser reescrita da seguinte forma [12]:

$$\Delta P = P_n - P_m + P_s + P_w \quad (6)$$

Onde,

$P_n, P_m$  – diferença de pressão total entre os nós n e m [Pa];

$P_s$  – diferença de pressão devido a diferenças de densidade de ar e cota [Pa];

$P_w$  – diferença de pressão devido à ação do vento [Pa];

A formulação da entrada e saída de ar nas aberturas verticais, tem origem numa fórmula proveniente do programa COMIS, onde é assumido que a densidade do ar varia de forma linear em função da altura [12]. Como se pode constatar de seguida:

$$\rho_i(z) = \rho_{0i} + b_i z \quad (7)$$

A diferença de pressão é assumida como linear e simula o efeito de turbulência [12]:

$$\Delta P_t = P_{t0} + b_t z \quad (8)$$

A diferença de pressão em cada lado é medida a partir da cota inferior da abertura. Assim sendo e assumindo que a hipótese de Bernoulli é válida para cada lado, a diferença de pressão pode ser definida em qualquer ponto através da cota z [12]:

$$P_1(z) - P_2(z) = (P_{01} - P_{02}) - g \left[ \left( \rho_{01} z + \frac{b_1 z^2}{2} \right) - \left( \rho_{02} z + \frac{b_2 z^2}{2} \right) \right] + (P_{t0} + b_t z) \quad (9)$$

Surge assim a metodologia de cálculo da velocidade a qualquer cota z, que é dada por [12]:

$$v(z) = \sqrt{2 \frac{P_1(z) - P_2(z)}{\rho}} \quad (10)$$

Em que,

$v(z)$  – velocidade do ar à cota z (m/s);

$P_1(z)$  – pressão do ar interior (Pa);

$P_2(z)$  – pressão do ar exterior (Pa);



$\rho$  – densidade do ar [ $\text{kg/m}^3$ ];

### 2.3.3. OPÇÕES DE INPUT

As opções de input para AirflowNetwork dividem-se em 5 grupos, que são:

- Parâmetros Gerais de Simulação
- Parâmetros Gerais Multi-zona
- Dados dos Nós
- Dados de Componentes Extra
- Ligação entre Componentes e Nós

No grupo Parâmetros Gerais de Simulação inserem-se os parâmetros gerais para que a simulação possa ocorrer. É neste momento que se escolhe o tipo de cálculos que se pretende que o programa realize [15], [17]:

- Cálculo dos caudais de ventilação, tendo em conta o uso de um sistema AVAC e seguindo um modelo de ventilação multi-zona;
- Cálculo dos caudais de ventilação, contando com o modelo de ventilação multi-zona;
- Cálculo dos caudais de ventilação, tendo em conta o uso de sistema AVAC, mas só para quando as ventoinhas do sistema estão ligadas;
- Cálculo dos caudais de ventilação não tendo em conta a interação entre as diversas zonas.

O segundo grupo consiste nos Parâmetros Gerais Multi-zona e é onde se insere a informação relativamente às zonas e à estrutura do edifício em estudo. Através desta informação o programa relaciona as aberturas existentes na habitação com o exterior para calcular a entrada e saída de ar. É também nesta altura que se realiza o cálculo dos coeficientes de pressão do vento. Através de todas as informações inseridas neste grupo o programa gera um nó para cada zona, sendo estes nós os pontos base de cada simulação [15], [17].

No terceiro grupo é onde se insere informação geral sobre o sistema de distribuição de ar. Nesta fase existe a possibilidade de se especificar a sequência de nós para alguns equipamentos mecânicos, não sendo porém, necessário introduzir os nós das zonas térmicas pois esses nós são criados no ponto anterior Parâmetros Gerais Multi-zona [15], [17].

Existem 8 divisões no grupo designado por Dados de Componentes Extra, todos estes tipos de componentes têm funções diferentes. Nos respetivos campos são especificadas características do sistema de ventilação existente e relacionam-se alguns equipamentos existentes na habitação com o modelo AirflowNetwork [15], [17].

Para finalizar existe ainda o grupo Ligação entre Componentes e Nós que define a coordenação entre os 2 grupos anteriores, ou seja, estabelece a relação entre cada componente implementada no programa com os nós. Estabelece-se a sequência de funcionamento do sistema de ventilação através da inserção dos nós de forma sequencial [15], [17].

O uso do modelo AirflowNetwork exige relacionar informação de diversos campos do programa. Para facilitar a compreensão da correlação de dados entre os diversos campos necessários para implementar o modelo AirflowNetwork surge a figura 4. Nesta figura surge um esquema onde é representada a

ligação entre os vários campos utilizados no modelo AirflowNetwork e as ligações deste modelo com outros campos relevantes do programa.

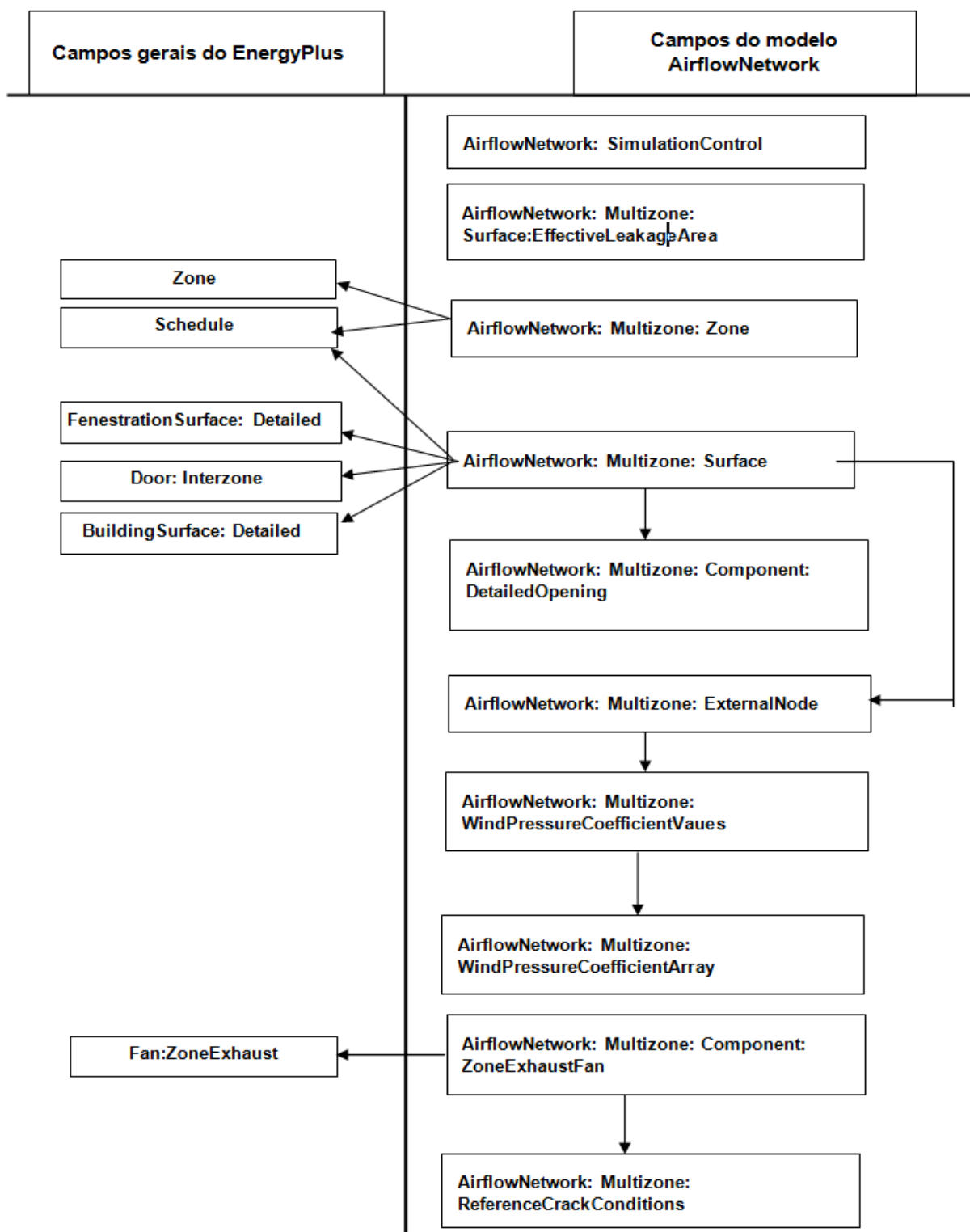


Figura 4 – Relação entre os vários campos do AirflowNetwork.

Constata-se assim que para preencher alguns campos do modelo em estudo, é necessário recorrer a dados existentes em campos exteriores ao próprio modelo. Assim sendo, para o preenchimento do

campo *AirflowNetwork: Multizone: Zone* é necessário recorrer à informação existente nos campos “zone” e “schedule”. O campo *AirflowNetwork: Multizone: Surface* recorre a informação proveniente dos campos *Schedule*, *FenestrationSurface: Detailed*, *Door: Interzone* e *BuildingSurface: Detailed*. Para finalizar o terceiro e último campo do modelo utilizado que recorre a informação exterior ao modelo é o campo *AirflowNetwork: Multizone: Component: ZoneExhaustFan* que emprega informação proveniente do campo *Fan: ZoneExhaust*.

## 2.4. CONCEITOS APLICADOS

### 2.4.1. CALOR SENSÍVEL E CALOR LATENTE

Existem diversas formas de transferência de calor entre zonas, tais como a convecção, a radiação ou a condução, estando todas elas associadas a trocas de calor sensível.

O calor sensível consiste numa troca de calor, sempre que existe mudança de temperatura entre duas zonas em estudo sendo a sua unidade de medida no sistema internacional (SI), o Joule. Um simples exemplo deste fenómeno chamado de troca de calor sensível, é o que ocorre com a colocação de uma mão numa superfície metálica fria, designando-se como, troca de calor por condução. O calor sensível depende do parâmetro calor específico, que é representado pela letra “c” e as unidades no SI são J/(kg.K). Este parâmetro “c”, consiste na quantidade de energia que é necessário fornecer a uma determinada massa, para que ocorra uma variação de temperatura unitária. Através da explicitação deste parâmetro “c”, pretende-se conseguir um melhor entendimento do conceito de calor sensível, e explicar a sua relação com o parâmetro temperatura [5].

O conceito calor latente consiste numa transferência de calor alterando o estado físico de uma substância através do fornecimento de energia. Porém esta alteração do estado físico ocorre sem aumento da temperatura. O calor latente depende do parâmetro calor de transformação mássico, consistindo este último na quantidade de energia necessária fornecer à massa de 1 Kg de uma substância para que mude de estado [5].

### 2.4.2. COEFICIENTES DE PRESSÃO DO VENTO

Para que se possa realizar uma simulação da ação do vento sobre um edifício, é necessário calcular o valor da pressão exercida sobre este, através da equação (11). Para aplicação desta expressão é necessário estabelecer primeiro o valor dos coeficientes de pressão do vento:

$$p = \delta_p w \quad (11)$$

Em que,

p – pressões exercidas sobre as superfícies;

$\delta_p$  – coeficientes de pressão do vento;

w – pressão dinâmica do vento;

As pressões devido ao efeito do vento que são exercidas sobre um edifício, resultam de pressões exteriores e interiores.

As pressões exteriores são definidas pelos coeficientes de pressão exterior ( $\delta_{pe}$ ) que dependem dos fatores: forma da construção, direção e sentido do vento. Quanto às pressões interiores, definidas pelos coeficientes de pressão interior ( $\delta_{pi}$ ), são originadas pela existência de aberturas na envolvente do edifício, e dependem dos mesmos fatores que as pressões exteriores e ainda da distribuição das aberturas no mesmo edifício.

Os valores dos coeficientes podem ser positivos ou negativos consoante se trate de pressões ou sucções nas faces da construção. E a resultante da ação do vento sobre cada uma dessas faces consiste na soma vetorial da resultante da pressão exterior e interior. [6]

#### 2.4.3. VENTILAÇÃO

A ventilação natural consiste no método mais antigo de “arejar” um edifício. Este tipo de ventilação explora simplesmente as potencialidades dos fatores da natureza, não recorrendo ao uso de qualquer mecanismo elétrico. A ventilação natural ocorre através das diferenças de pressão que resultam do vento ou das diferenças de temperatura existente entre duas zonas. O vento que incide numa fachada de um edifício provoca pressões positivas nessa mesma fachada, gerando pressões negativas na fachada oposta, o que origina o deslocamento do ar no sentido da fachada com pressão positiva para a fachada com pressão negativa. A ventilação resultante da diferença de temperatura entre o ar interior e exterior, ocorre devido ao ar quente e húmido ser mais leve que o ar frio e seco. Assim quando o ar interior está a uma temperatura superior à do exterior, gera-se um fluxo de ar em que, o ar interior abandona o edifício através das aberturas localizadas a cota superior e ocorre entrada de ar proveniente do exterior pelas aberturas a cota mais baixa [7].

Em determinadas situações o sistema de ventilação natural não consegue assegurar uma adequada ventilação, tornando-se portanto necessário recorrer ao uso de equipamentos mecânicos. No caso da ventilação mecânica, as variações de pressão existentes são geradas, usualmente, por aparelhos mecânicos chamados de ventiladores. O mais adequado é implementar um sistema que integre ventilação natural e ventilação mecânica, sendo este tipo de sistema designado por ventilação híbrida. A ventilação híbrida permite reduzir as desvantagens típicas dos dois modos de ventilação referidos. A principal desvantagem da ventilação natural é a inconstância da ventilação motivada pelos factores meteorológicos, pelo que não é possível assegurar constantemente uma ventilação adequada. A ventilação mecânica tem como principais desvantagens o custo de utilização e o ruído. Integrando os dois sistemas consegue-se reduzir as desvantagens de cada uma delas [7].

Assim, na realização de um projeto de ventilação para um edifício, tenta-se retirar o máximo partido da ventilação natural, reduzindo desta forma os gastos de energia derivados do uso de ventilação mecânica, sendo no entanto importante, também, recorrer à ventilação mecânica para se conseguir assegurar sempre uma ventilação apropriada para o edifício.

# 3

## DESCRIÇÃO E SIMULAÇÃO DO CASO EM ESTUDO

### 3.1. DESCRIÇÃO DO CASO EM ESTUDO

#### 3.1.1. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO GERAL

A modelação incide sobre a uma habitação existente na Freguesia de Lordelo do Ouro, no concelho do Porto. Pretende-se assim estudar o comportamento da habitação e as interações entre os vários compartimentos, através de simulações com o programa, recorrendo ao modelo de ventilação multi-zona. Existem, simultaneamente, no mesmo caso de estudo, equipamentos mecânicos com capacidade de medir as propriedades tais como temperatura e humidade relativa, possibilitando assim no futuro uma possível comparação e validação do modelo implementado nesta dissertação.

A freguesia de Lordelo do Ouro tem 3,4 km<sup>2</sup> de área e situa-se na zona mais ocidental da cidade do Porto. A freguesia possuiu em tempos outra notoriedade sendo, atualmente, cada vez mais um espaço de habitual pequeno comércio e serviços. Este facto deve-se especialmente ao processo de transformação que o local sofreu, decorrente da implantação de diversos bairros de habitação social nesta freguesia. Com as diversas consequências daí derivadas, designadamente, ao nível do poder económico do local [18].

O edifício em estudo situa-se no bairro de Lordelo, localizado na freguesia de Lordelo do Ouro. O edifício faz parte de uma das várias habitações sociais presentes neste bairro, que foi construído em 1978, sendo constituído por 4 blocos, que no seu total integram 179 fogos. Os dados mais recentes apontam para cerca de 450 pessoas a habitar os 4 blocos, resultando aproximadamente 2,5 pessoas por habitação. Na figura 5 é apresentada uma fotografia da vista aérea do bairro.



Figura 5 – Vista aérea do bairro.

Este bairro foi recentemente sujeito a obras de reabilitação por parte da Câmara do Porto, para melhorar as condições precárias de habitabilidade que apresentava anteriormente o bairro de Lordelo, que nunca tinha sido alvo de qualquer ação de reabilitação, até recentemente. Surgindo agora, com um aspeto renovado capaz de proporcionar boas condições para os seus inquilinos.



Figura 6 – Edifício em estudo.

Um aspeto importante é a caracterização detalhada do edifício em análise. Assim sendo é fundamental possuir a planta do local em estudo, bem como as características que descrevam os materiais opacos e os envidraçados existentes na obra. Não serão porém descritos ao pormenor nesta dissertação os materiais, devido à existência de uma dissertação [11] já realizada neste bairro, onde tal informação pormenorizada é descrita.

A principal diferença entre os dois casos de estudo consiste que na tese anteriormente referida, a habitação em análise possuía tipologia T1, enquanto a habitação em estudo nesta dissertação consiste num apartamento T3.

O caso em estudo consiste pois num apartamento T3, localizado no quarto andar do bloco nº 14. É um apartamento central, ou seja, situa-se entre outros 2 apartamentos, possuindo portanto 2 frentes, as quais são voltadas para Nordeste e Sudoeste, sendo que em ambas as frentes existem vãos envidraçados. Na figura seguinte surge um alçado do edifício, em que está assinalado com a cor verde a habitação em estudo.



Figura 7 – Fachada de Sudoeste do edifício em estudo.

### 3.1.2. APARTAMENTO EM ESTUDO

Descrevendo agora o apartamento em si, é de tipologia T3 como já foi referido, constituído por um pequeno hall que dá acesso à sala e à cozinha. A cozinha integra ainda uma zona que é usada como lavandaria. De salientar a existência somente de uma casa de banho, e que os 3 quartos existentes são voltados a Sudoeste como se pode constatar pela planta.

Consideraram-se assim neste estudo a existência de 7 zonas térmicas que são:

- A casa de banho – zona 1
- A sala e o hall de entrada – zona 2
- A cozinha e lavandaria – zona 3
- Quarto 1 – zona 4
- Quarto 2 – zona 5
- Quarto 3 – zona 6
- A caixa de escadas – zona 7



A tabela seguinte descreve as áreas e os volumes de cada zona:

Tabela 1 – Áreas e Volumes dos compartimentos.

Zonas	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )
1	5,92	16,28
2	19,79	54,42
3	10,08	29,7
4	11,18	30,74
5	9,28	25,52
6	11,18	30,74
7	7,95	21,86

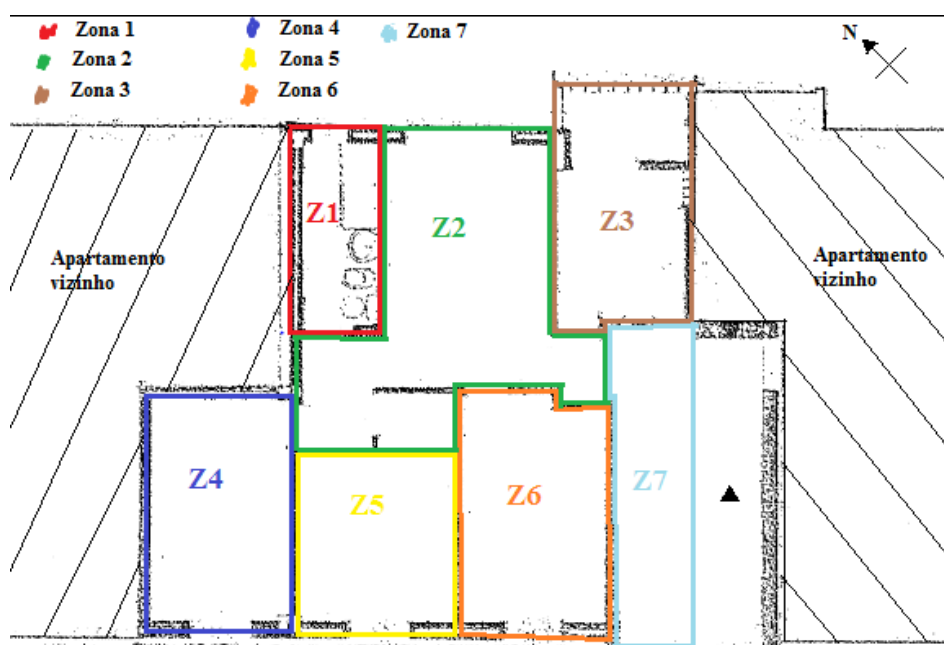


Figura 8 – Planta do apartamento.

Admite-se que cada zona terá o seu próprio comportamento de ventilação, a sua própria temperatura, e humidade relativa, sendo os respetivos valores calculados pela simulação do programa para um nó fictício em cada uma das sete zonas.

Uma vez que se trata de uma habitação social, foram consideradas 5 habitantes no apartamento T3, ao contrário do sugerido pelo RCCTE que recomenda 4 habitantes para este tipo de tipologia. A justificação para esta consideração é a usual sobreocupação das habitações nos bairros sociais. A ocupação dos quartos existentes será portanto 2 elementos nos quartos Q1 e Q2 e 1 elemento no quarto Q3.

Os períodos adotados para a ocupação de cada uma das zonas da habitação são o resultado de inquéritos realizados aos moradores do bairro sobre os seus hábitos diários. A informação



relativamente aos inquéritos foi fornecida pelo Engenheiro António Curado. Com base nos dados dos inquéritos apresentam-se na seguinte tabela os horários de ocupação de cada zona:

Tabela 2 – Horários de ocupação de cada zona.

<b>Zonas</b>	<b>Horário de ocupação</b>
Zona 1	09:00 -10:00
	21:00 – 22:00
Zona 2	21:00 – 24:00
Zona 3	10:00 – 11:00
	19:00 – 20:00
Zona 4 a zona 6	00:00 – 08:00

Para a zona 1 que corresponde à casa de banho, optou-se por uma ocupação de dois períodos diários. Esta opção tem em conta o elevado número de habitantes no apartamento T3 e portanto foram considerados dois períodos para banhos diários.

A sala é ocupada normalmente entre as 21horas e as 24horas, período habitual de convívio.

No caso da cozinha foram considerados novamente dois períodos de ocupação em função da existência das duas grandes refeições diárias, o almoço e o jantar.

Quanto aos quartos definiu-se um período de 8 horas de sono para os habitantes entre a meia-noite e as 8 horas da manhã.

Devido a não se conseguir definir períodos de ocupação para a caixa de escadas, pois consiste simplesmente num local de passagem, não lhe foi atribuído qualquer período de ocupação.

### 3.1.3. CLIMA

Como o caso em estudo se situa na cidade do Porto, então está sujeito a um clima temperado. Os meses nos quais se registam as temperaturas mais baixas são nos meses Dezembro, Janeiro e Fevereiro. Nestes meses registam-se ventos fortes e chuvas intensas. Os meses mais quentes para a cidade do Porto são Julho e Agosto e as temperaturas máximas da ordem dos 30 °C. A temperatura média da cidade é de 14.5 °C [19].

Na figura 9 é representada a temperatura exterior na cidade do Porto para um período de um ano. Os valores provêm dos dados climáticos disponibilizados pelo programa.

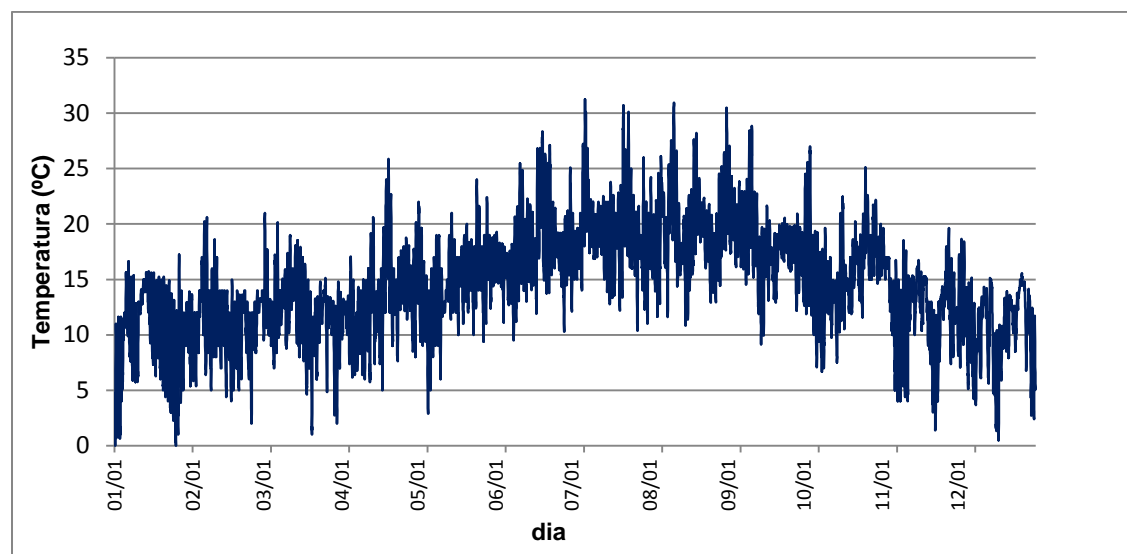


Figura 9 – Temperatura exterior na cidade do Porto para um período de um ano.

#### 3.1.4. VENTILAÇÃO

No apartamento em estudo, no que diz respeito à ventilação, considera-se que está implementado um sistema de ventilação conjunta. Este consiste numa estratégia de ventilação na qual todas as divisões da habitação estão englobadas, sendo realizada a admissão de ar pelos compartimentos principais que no presente caso são os quartos e a sala, e exaustão pelos compartimentos de serviço, que consistem na cozinha e casa de banho. A admissão de ar nos compartimentos principais é realizada fundamentalmente através de grelhas. As grelhas permitem regular o caudal de entrada de ar, possibilitando assim a obtenção de um caudal aproximadamente constante para uma determinada gama de gradientes de pressão. As grelhas funcionam com base na diferença de pressão existente entre o interior e o exterior. Existe ainda a possibilidade de abertura das janelas para aumentar o grau de ventilação presente no apartamento, sendo de salientar ainda, a permeabilidade das janelas por onde existe uma passagem contínua de ar, apesar de pouco significativa [20].



Figura 10 – Janelas e grelhas presentes nos quartos.

A extração de ar realizada na casa de banho ocorre através da presença de um extrator mecânico, colocado, por cima da banheira. Este extrator mecânico é acionado manualmente, logo considera-se

que somente é acionado para os períodos de banho, ou seja, os períodos definidos como períodos de ocupação da zona. Existe ainda, na cozinha, um exaustor que possui um caudal de extração constante ao longo do dia.

A extração mecânica provoca pressões negativas no interior do edifício, o que origina a admissão de ar proveniente do exterior através das aberturas existentes. Deste modo, os equipamentos mecânicos utilizados nos compartimentos de serviço permitem assegurar taxas de ventilação mais adequadas. Porém é necessário ter em conta possíveis desvantagens destes aparelhos tais como: consumo de energia, custo de manutenção, níveis de ruídos [21].



Figura 11 – Equipamentos mecânicos presentes na habitação.

## 3.2. SIMULAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

### 3.2.1 INTRODUÇÃO

Neste subcapítulo apresentam-se os dados introduzidos no programa EnergyPlus, acompanhados de uma breve explicação. No entanto serão descritas as novidades introduzidas na modelação com o programa EnergyPlus em relação à tese anteriormente referida: “Influência do regime de ventilação no comportamento higrotérmico de habitações sem aquecimento contínuo” [11]. Pois não se pretende tornar esta dissertação num trabalho demasiado exaustivo sobre como manusear o programa. O programa EnergyPlus não é o objetivo da tese mas sim uma mera ferramenta para alcançá-lo.

Para a presente dissertação foi utilizada a versão 7.0 do programa EnergyPlus, a versão mais recente até a data de realização. O modelo base do programa, sobre o qual se desenvolve este trabalho, foi fornecido pelo Engenheiro António Curado.

### 3.2.2 SELEÇÃO DO ALGORITMO

A escolha do algoritmo de cálculo de transferência de calor e humidade da presente dissertação, baseou-se na capacidade de se obter resultados mais fiáveis possíveis, assim sendo recorreu-se aos modelos mais complexos. Optou-se pela escolha dos algoritmos *Effective Moisture Penetration Depth (EMPD)* e pelo *Combined Heat and Moisture Transfer (HAMT)*. Ambos agrupados no campo designado *HeatBalanceAlgorithm* com os nomes *Moisture Penetration Depth Conduction TransferFunction* e *Combined Heat And Moisture Finite Element* respetivamente.

A inserção do modelo AirflowNetwork foi conjugada com o modelo EMPD, devido ao facto de as simulações realizadas usando o modelo HAMT terem uma duração bastante elevada. A utilização do modelo HAMT integrado com o modelo AirflowNetwork implica um período de 6 horas para a realização de uma simulação, enquanto para terminar uma simulação usando o modelo EMPD a duração é inferior a uma hora. Sendo que para o desenvolvimento deste trabalho foi necessário realizar um elevado número de simulações, era pouco prático apostar no modelo HAMT como modelo base. Antes de se introduzir o modelo Airflow foi realizada a comparação entre os modelos EMPD e HAMT, para verificar a fiabilidade dos resultados. Assim sendo, a partir do momento que os resultados do modelo EMPD são satisfatórios e se assemelham aos do modelo HAMT, pode-se prosseguir para a introdução da componente de ventilação pretendida. Deste modo a fiabilidade dos resultados obtidos através do modelo EMPD está assegurada.

### 3.2.3 HORÁRIOS DE OCUPAÇÃO

Os horários de ocupação mencionados no capítulo anterior, são inseridos no campo *Schedule:Compact* do EnergyPlus da seguinte forma:

Field	Units	Obj1	Obj3	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9	Obj10
Name		sch_actividade	sch_ocupação_Z3	sch_infiltração_Z7	sch_ocupação_Z2	sch_ocupação_Z1	sch_ocupação_Z4Z5Z6	sch_infiltração	sch_fechar
Schedule Type Limits Name		any number	any number	any number	any number	any number	any number	any number	any number
Field 1	varies	Through:12/31	Through:12/31	Through:12/31	Through:12/31	Through:12/31	Through:12/31	Through:12/31	Through:12/31
Field 2	varies	For:alldays	For:alldays	For:alldays	For:alldays	For:alldays	For:alldays	For:alldays	For:alldays
Field 3	varies	Until:24:00	Until:10:00	Until:24:00	Until:21:00	Until:9:00	Until:8:00	Until:24:00	Until:24:00
Field 4	varies	126	0	1	0	0	1	1	0
Field 5	varies		Until:11:00		Until:24:00	Until:10:00	Until:24:00		
Field 6	varies		1		1	1	0		
Field 7	varies		Until:19:00			Until:21:00			
Field 8	varies		0			0			
Field 9	varies		Until:20:00			Until:22:00			
Field 10	varies		1			1			
Field 11	varies		Until:24:00			Until:24:00			
Field 12	varies		0			0			

Figura 12 – Campo de seleção *Schedule Compact*.

Neste campo, como se pode constatar na Figura 12, não são somente inseridos os horários de ocupação mas também horários de outras atividades, tais como infiltração, atividade dos moradores, entre outros.

### 3.2.4 CARACTERIZAÇÃO DA HABITAÇÃO

No terceiro capítulo foram referidas as 7 zonas existentes no apartamento em estudo. A introdução dos dados referentes a cada uma das zonas térmicas realiza-se no campo designado *Zone*. Neste campo são inseridas as coordenadas, segundo um referencial cartesiano, de cada uma das zonas, e como se pode constatar a origem do referencial considerado é no quarto 1.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7
Name		Z1-Casa de Banho	Z3-Cozinha e Lavar	Z4-Quarto 1	Z5-Quarto 2	Z6-Quarto 3	Z7-CaixaEscadas	Z2-Sala
Direction of Relative North	deg	0	0	0	0	0	0	0
X Origin	m	2,6	7,2	0	2,6	5,5	8,1	2,6
Y Origin	m	5,3	5,3	0	0	0	0	3,2
Z Origin	m	0	0	0	0	0	0	0
Type		1	1	1	1	1	1	1
Multiplier		1	1	1	1	1	1	1
Ceiling Height	m	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Volume	m3	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Floor Area	m2	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Zone Inside Convection Algorithm								
Zone Outside Convection Algorithm								
Part of Total Floor Area		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

Figura 13 – Campo de seleção *Zone*.

Após definição das zonas pode-se proceder à inserção das condições de fronteira dos elementos pertencentes ao apartamento. Foram colocados estes dados no campo *Building Surface:Detailed*. Neste campo inserem-se os seguintes dados:

- Nome do elemento;
- Tipo de superfície, isto é, parede, chão ou tecto;
- É definida a zona e o local onde se situa o elemento;
- É especificado se o elemento se encontra exposto ao sol ou ao vento.

Aparece de seguida o exemplo do preenchimento deste campo, em que foram criadas 54 componentes.

Field	Units	Obj52	Obj53	Obj54
Name		ParedeExteriorCaixaEscadas	LajeCoberturaCaixa	LajePavimentoCaixaEscadas
Surface Type		Wall	Roof	Floor
Construction Name		Parede Separação Cx Escad	Cobertura	Pavimento
Zone Name		Z7-CaixaEscadas	Z7-CaixaEscadas	Z7-CaixaEscadas
Outside Boundary Condition		Outdoors	Outdoors	Adiabatic
Outside Boundary Condition Object				
Sun Exposure		NoSun	NoSun	NoSun
Wind Exposure		WindExposed	NoWind	NoWind
View Factor to Ground		autocalculate	autocalculate	autocalculate
Number of Vertices		autocalculate	autocalculate	autocalculate
Vertex 1 X-coordinate	m	1,5	0	0
Vertex 1 Y-coordinate	m	0	5,4	5,4
Vertex 1 Z-coordinate	m	2,75	2,75	0
Vertex 2 X-coordinate	m	1,5	0	1,5
Vertex 2 Y-coordinate	m	0	4,3	5,4
Vertex 2 Z-coordinate	m	0	2,75	0
Vertex 3 X-coordinate	m	1,5	0	1,5
Vertex 3 Y-coordinate	m	5,4	0	0
Vertex 3 Z-coordinate	m	0	2,75	0
Vertex 4 X-coordinate	m	1,5	1,5	0
Vertex 4 Y-coordinate	m	5,4	0	0
Vertex 4 Z-coordinate	m	2,75	2,75	0
Vertex 5 X-coordinate	m		1,5	0
Vertex 5 Y-coordinate	m		5,4	4,3
Vertex 5 Z-coordinate	m		2,75	0

Figura 14 – Campo de seleção *Building Surface Detailed*.

São de salientar os parâmetros *Sun Exposure* e *Wind Exposure*, pois são parâmetros com influência nos aspetos que se pretendem analisar. As componentes da envolvente sujeitas ao efeito direto do sol são somente as paredes exteriores, a laje de teto não é considerada devido à existência de um desvão ventilado na cobertura que protege a laje do efeito solar. Quanto ao efeito da ação do vento somente os elementos interiores é que não se encontram afetados.

De seguida foi realizada a introdução dos dados no programa onde, se define os tipos de janelas, portas, palas, e a localização destes mesmos. Na presente dissertação não se exemplifica o preenchimento destes campos, pois tal já foi realizado no trabalho de Costa, H. 2012 [11], não se pretendendo repetir o trabalho realizado na referida dissertação.

Para confirmar que se realizou de forma correta a inserção dos pontos no programa EnergyPlus existe um output que permite obter a imagem do apartamento em formato CAD. Como se pode verificar na figura 15, a imagem gerada pelo programa corresponde à planta pretendida.

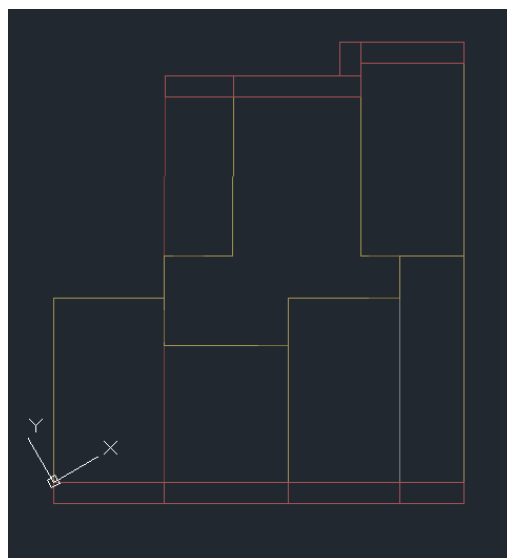


Figura 15 – Planta do apartamento gerada pelo programa.

### 3.2.5 GANHOS INTERNOS

A produção de calor, resultante dos ganhos internos considerados no modelo em questão, deve-se à presença dos moradores, as suas atividades e à iluminação existente.

Para definição dos ganhos internos provenientes das atividades das pessoas existentes em cada zona, é necessário introduzir os dados no campo *People*. Neste campo relacionou-se a frequência das pessoas em cada zona com os horários de ocupação anteriormente citados. A taxa metabólica a que cada zona está sujeita corresponde a 126W/pessoa, estando este valor definido num *schedule* criado.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		Pessoas "CasadeBanho"	Pessoas "Sala"	Pessoas "CozinhaeLavandaria"	Pessoas "Quarto1"	Pessoas "Quarto2"	Pessoas "Quarto3"
Zone or ZoneList Name		Z1-Casa de Banho	Z2-Sala	Z3-Cozinha e Lavandaria	Z4-Quarto 1	Z5-Quarto 2	Z6-Quarto 3
Number of People Schedule Name		sch_ocupação_Z1	sch_ocupação_Z2	sch_ocupação_Z3	sch_ocupação_Z4Z5Z6	sch_ocupação_Z4Z5Z6	sch_ocupação_Z4Z5Z6
Number of People Calculation Method		People	People	People	People	People	People
Number of People		1	5	5	2	2	1
People per Zone Floor Area	person/m2						
Zone Floor Area per Person	m2/person						
Fraction Radiant		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Sensible Heat Fraction		autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Activity Level Schedule Name		Sch_actividade	Sch_actividade	Sch_actividade	Sch_actividade	sch_actividade	sch_actividade
Carbon Dioxide Generation Rate	m3/s-W						
Enable ASHRAE 55 Comfort Warnings		No	No	No	No	No	No

Figura 16 – Campo de seleção *People*.

Quanto à iluminação, foi considerado que estão ligadas em função do estado de ocupação das zonas, e foi atribuída uma potência útil de 15 W/m<sup>2</sup>.

A produção de vapor de água é um parâmetro interessante de analisar em determinadas zonas, devido à realização de determinadas atividades tais como: banhos, cozinhar, funcionamento de máquinas, etc..

No EnergyPlus para se simular a produção de vapor de água é necessário recorrer ao campo *People*. A forma de simular a produção de vapor consegue-se criando uma nova atividade e atribuindo-lhe determinada potência, sendo necessário especificar no programa que a energia produzida deve ser toda transformada em calor latente, ou seja, quando o programa pergunta a quantidade de calor sensível insere-se o valor zero. Deste modo está-se a utilizar a atividade humana para representar a realização de determinadas atividades ou funcionamento de determinados aparelhos, através da especificação de um valor de potência e considerando o calor sensível igual a zero.

Assim sendo, foram criadas duas atividades designadas “banhos” e “cozinhar”. É necessário especificar em que zona cada atividade decorre, e para cada uma destas atividades foram escolhidos os períodos de funcionamento, que coincidem com os períodos de ocupação da zona 1 e da zona 3, respetivamente. No campo *Fraction Radiant* insere-se o valor de zero sendo que este campo não tem importância neste ponto pois é um valor que se multiplica pelo calor sensível. Sendo o calor sensível zero, o número inserido no campo *Fraction Radiant* não tem relevância. De seguida segue um campo extremamente importante, onde se particulariza que o calor sensível produzido é igual a zero, resultando assim que toda a energia produzida é transformada em calor latente. Se fosse pretendido que toda a energia produzida fosse considerada calor sensível dever-se-ia introduzir neste campo o valor 1. Para finalizar, nomeia-se qual o *schedule* que representa o agendamento da atividade pretendida.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		"banhos"	"cozinhar"
Zone or ZoneList Name		Z1-Casa de Banho	Z3-Cozinha e Lavar
Number of People Schedule Name		sch_ocupação_Z1	sch_ocupação_Z3
Number of People Calculation Method		People	People
Number of People		1	1
People per Zone Floor Area	person/m2		
Zone Floor Area per Person	m2/person		
Fraction Radiant		0	0
Sensible Heat Fraction		0	0
Activity Level Schedule Name		banho	cozinhar

Figura 17 – Campo de seleção *People*.

Neste agendamento desenvolvido, o programa recorre ao valor no campo número 4, campo assinalado na figura 18, que consiste na potência calorífica e tem como unidade o watt.

Field	Obj1	Obj2
Name	banho	cozinhar
Schedule Type Limits Name	any number	any number
Field 1	Through:12/31	Through:12/31
Field 2	For:alldays	For:alldays
Field 3	Until:24:00	Until:24:00
Field 4	333	350

Figura 18 – Campo de seleção *Schedule Compact*.

A forma como foi calculado esta potência foi através da fórmula [22]:

$$\Delta h * \dot{m} = \dot{Q} \quad (12)$$

em que:

$\dot{m}$  – fluxo de vapor [Kg/s];

$\Delta h$  – variação de entalpia [J/Kg];

$\dot{Q}$  – potência calorífica [J/s = W];

Deste modo através dos schedules criados e dos dados inseridos no campo *People* é possível simular a produção de vapor de água em diversas atividades tais como, banhos e cozedura de alimentos.

### 3.2.6 AIRFLOWNETWORK

Um dos principais objetivos da presente dissertação é a inserção do modelo ventilação multi-zona no caso de estudo. Assim neste ponto 3.2.7 aprofundar-se-á um pouco mais cada parâmetro utilizado, baseando a estruturação deste subcapítulo nos 5 grandes grupos do AirflowNetwork atrás referidos.

#### 3.2.6.1. Parâmetros de Simulação

Inicialmente é necessário decidir que tipo de sistema de ventilação se pretende e nomeá-lo. No campo *AirflowNetwork:SimulationControl* são definidos os parâmetros base do sistema que irá ser desenvolvido. No parâmetro *AirflowNetwork Control* optou-se pela *MultizoneWithoutDistribution*, pois é a opção que melhor adapta o modelo ao apartamento existente. Através desta opção é considerada a interligação dos fluxos de ar entre as diversas zonas. O facto de se ter optado por esta opção em vez de *MultizoneWithDistribution* deve-se ao facto de não existir recirculação de ar, o que implicaria a existência de um sistema AVAC no apartamento em questão. O tipo de ventilação existente no apartamento é ventilação mecânica, pois existe um funcionamento contínuo do exaustor da cozinha e durante alguns períodos diários da ventoinha localizada na casa de banho. Porém o tipo de ventilação em projeto não confere com a que existe noutros apartamentos localizados no bairro. Em diversos apartamentos existentes no bairro, os utilizadores cortaram o funcionamento do exaustor da cozinha, instalando um exaustor de funcionamento com controlo manual. Esta alteração no sistema de ventilação da habitação, leva a que durante determinados períodos do dia exista somente ventilação natural na habitação, e a ventilação mecânica só é ativada nos períodos de funcionamento da casa de banho e da cozinha. Considera-se portanto que se está perante um sistema de ventilação híbrida neste tipo de apartamentos.

O programa fornece um método automático de cálculo dos coeficientes de vento, e a criação dos respetivos nós externos, que se designa por *SurfaceAverageCalculation*. Porém a escolha deste método de cálculo só é válida no caso de se pretender simular um edifício retangular. Como este não é o caso, e ainda se tem de ter em conta o facto do apartamento em questão estar inserido dentro de um edifício, optou-se pela opção *Input* no parâmetro *Wind Pressure Coefficient Type*. Através desta opção *input* o utilizador pode personalizar o modelo de forma mais eficaz, não tendo as restrições existentes na opção *SurfaceAverageCalculation*.



Neste grupo é decidido ainda se a velocidade de cálculo do vento é determinada consoante a altura das aberturas, ou se é consoante a altura dos nós externos criados. Para o caso em estudo optou-se pela primeira opção; deste modo o programa calcula a velocidade do vento consoante a altura das aberturas existentes, janelas ou grelhas.

Foram consideradas 500 iterações como número máximo de iterações que o programa realiza para encontrar uma solução para o modelo de ventilação multi-zona. Se o número de iterações superar o número mencionado em cada simulação, então a simulação termina e é enviada mensagem de erro.

Field	Units	Obj1
Name		ventilacao1
AirflowNetwork Control		MultizoneWithoutDistribution
Wind Pressure Coefficient Type		Input
AirflowNetwork Wind Pressure Coefficient Array Name		cada 90 graus
Height Selection for Local Wind Speed Calculation		OpeningHeight
Building Type		
Maximum Number of Iterations	dimensionless	500
Initialization Type		LinearInitializationMethod
Relative Airflow Convergence Tolerance	dimensionless	0,0001
Absolute Airflow Convergence Tolerance	kg/s	0,000001
Convergence Acceleration Limit	dimensionless	-0,5

Figura 19 – Campo de seleção *AirflowNetwork: Simulation Control*.

No parâmetro *Initialization Type* surgem as duas formas de inicializar as simulações disponíveis no programa, tal como foi descrito no capítulo dois na descrição da metodologia de funcionamento do programa, tendo-se optado pela opção *LinearInitializationMethod* pois é a solução mais consistente e que apresenta resultados mais reais.

São definidos os valores para os quais se torna aceitável o erro, nas iterações da convergência de valores entre a circulação do fluxo de ar, nas diversas zonas. Como se pode verificar os valores obtidos são valores muito fiáveis, pois a tolerância é muito reduzida.

### 3.2.6.2. Zonas e Tipos de Ventilação

No campo *AirflowNetwork:Zone* são especificadas as zonas térmicas sujeitas ao modelo de ventilação multi-zona. Consideraram-se seis zonas, ou seja, não se contabilizou a caixa de escadas como uma zona térmica relevante para o estudo, devido a não serem de esperar grandes trocas de fluxo de ar entre o hall e a caixa de escadas. O facto de a ligação entre estas duas zonas ser efetuada somente por uma porta bastante estanque, e que somente será aberta para permitir a entrada e saída dos moradores, permite considerar nulo o fluxo de ar trocado entre as duas zonas. Surge assim o esquema na Figura 20, que pretende representar um possível padrão de distribuição de fluxos de ar:

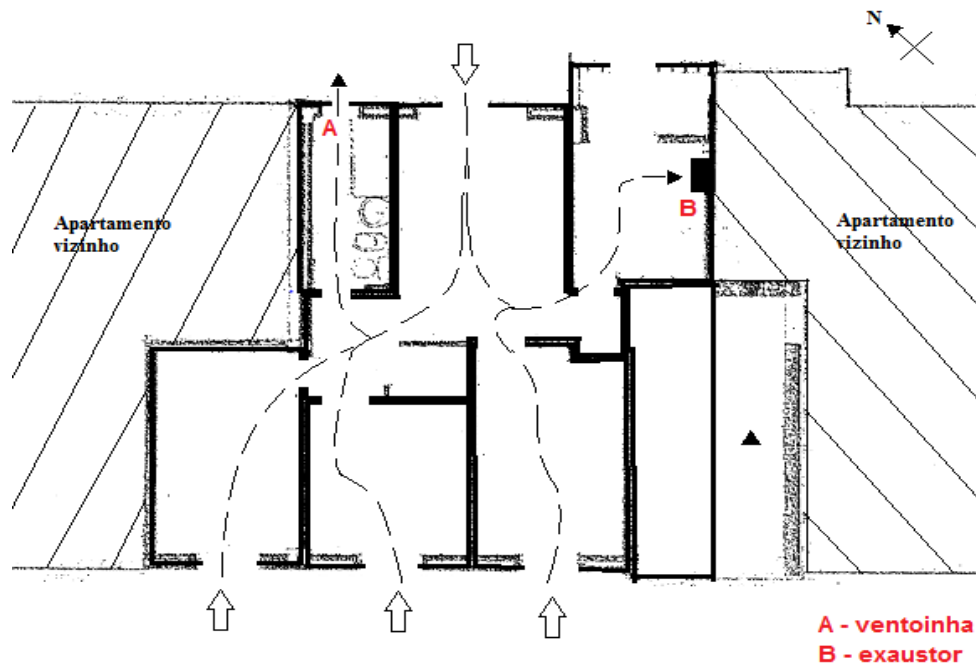


Figura 20 – Esquema de ventilação.

Pode-se ainda especificar os horários de ventilação a que cada zona está sujeita, bem como formas de controlo da ventilação. O programa dispõe de métodos para controlar a temperatura interior, e consoante se estiver a aproximar dos limites previamente estabelecidos pelo utilizador, abrem-se automaticamente as janelas e portas para regularizar a temperatura. Também é possível realizar o controlo do parâmetro entalpia de forma semelhante. É ainda possível o controlo do conceito conforto, em que o programa segue os valores da norma ASHRAE 55.

É ainda necessário relacionar as aberturas existentes e as paredes em que se localizam, bem como os nós exteriores a que estão ligadas caso se trate de aberturas para o exterior.

Surge deste modo o campo *AirflowNetwork:MultiZone:Surface* na figura seguinte, em que são exemplificadas algumas das aberturas introduzidas. Os tipos de elementos existentes no modelo para ligação de zonas são as portas e como meios de ligação com o exterior existem as janelas, as grelhas e os mecanismos de ventilação mecânica. Neste campo é definido ainda o tipo de controlo da ventilação sendo que o escolhido consiste na opção *Constant* que permite controlar a ventilação através da opção *VentingScheduleName*. Deste modo o programa considera uma ventilação constante durante um período de tempo definido, permitindo, assim, realizar a abertura de janelas em determinadas alturas do dia para simular diversos possíveis cenários de ventilação. O programa oferece ainda a possibilidade de abrir só determinados elementos à escolha do utilizador, permitindo deste modo uma adaptação do modelo.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Surface Name		JanelaCasadeBanho(Nordeste)	PortaCasaBanho	JanelaSala(Nordeste)	JanelaQuarto1(Sudoeste)
Leakage Component Name		janela	Porta	janela	janela
External Node Name		ParedeExterior WC		Parede Exterior Sala	Parede Exterior Q1
Window/Door Opening Factor, or Crack Factor	dimensionless	1	1	1	1
Ventilation Control Mode		Constant	Constant	Constant	Constant

Figura 21 – Campo de seleção *AirflowNetwork: MultiZone Surface*.

De seguida surge a introdução de toda a informação que é relacionável neste campo.

Em primeiro lugar é necessário especificar as propriedades das 4 grelhas existentes na habitação, uma para cada compartimento principal, e que são:

- A área definida para cada grelha é de 48cm<sup>2</sup> para os 3 quartos, e de 96cm<sup>2</sup> para a sala;
- O valor de referência do diferencial de pressão é de 20 Pa;
- O coeficiente de descarga toma o valor de 1;
- O expoente de escoamento tem como valor 0,65 correspondente ao escoamento que se verifica nas grelhas ser um escoamento próximo do escoamento laminar.

Na figura 22 surge a introdução dos dados anteriormente referidos no programa.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		LGrelha q1	LGrelha q2	LGrelha q3	LGrelha sala
Effective Leakage Area	m2	0,0048	0,0048	0,0048	0,0096
Discharge Coefficient	dimensionless	1	1	1	1
Reference Pressure Difference	Pa	20	20	20	20
Air Mass Flow Exponent	dimensionless	0,65	0,65	0,65	0,65

Figura 22 – Campo de seleção *AirflowNetwork: Multi Zone Surface Effective Leakage Area*.

Através das propriedades discriminadas anteriormente para cada grelha, o programa baseando-se numa fórmula matemática simula um caudal de admissão de ar com base na pressão exercida pelo vento. O caudal é portanto traduzido pela seguinte fórmula [12], [17]:

$$\dot{m} = ELA * C_d * \sqrt{2\rho} * (\Delta P_r)^{0.5-n} * \Delta P^n \quad (13)$$

Em que,

$\dot{m}$  – fluxo de ar [kg/s];

ELA – área da grelha [m<sup>2</sup>];

$C_d$  – coeficiente de descarga [adimensional];

$\rho$  – densidade do ar [kg/m<sup>3</sup>];

$\Delta P_r$  – valor de referência do diferencial de pressão [Pa];

$\Delta P$  – diferencial de pressão na grelha [Pa];

$n$  – expoente de escoamento [adimensional];

O coeficiente de descarga introduz na equação o efeito da viscosidade quando o fluido atravessa a abertura. O coeficiente depende da diferença da temperatura, da velocidade, do vento e da geometria da abertura. O expoente  $n$  caracteriza o regime de escoamento e varia entre 0,5 para escoamento turbulento e 1,0 para escoamento laminar. Para aberturas pequenas o escoamento está mais próximo do escoamento laminar verificando-se que  $n$  é aproximadamente 0,65. Para grandes aberturas, o escoamento está mais próximo de um escoamento turbulento tomando  $n$  o valor de 0,5 [16].

No campo *AirflowNetwork:Multizone:Component:DetailedOpening* especificam-se as características das janelas e das portas existentes no apartamento. Para completar alguns dos dados necessários para este campo, recorreu-se à publicação [8]. Consoante o tipo de janela e o modo de abertura, varia o valor do parâmetro *Air Mass Flow Coefficient when opening is closed*, que corresponde ao valor da permeabilidade das janelas ou portas quando se encontram fechadas. O programa gera automaticamente 4 aberturas em torno do elemento criado com base num caudal introduzido, ou seja, com base neste mesmo caudal introduzido, expresso em unidades kg/s (em vez dos habituais m<sup>3</sup>/h) por metro de janela o programa EnergyPlus gera 4 aberturas em torno da janela que, dependendo dos fatores meteorológicos, potenciam a admissão de ar pelas aberturas ou não.

É ainda possível definir o estado de abertura, pelo que para o presente trabalho somente foram considerados dois estados: totalmente aberta ou totalmente fechada.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		janela	Porta
Air Mass Flow Coefficient When Opening is Closed	kg/s-m	0,00035	0,0024
Air Mass Flow Exponent When Opening is Closed	dimensionless	0,65	0,65
Type of Rectangular Large Vertical Opening (LVO)		NonPivoted	NonPivoted
Extra Crack Length or Height of Pivoting Axis	m	0,001	0,001
Number of Sets of Opening Factor Data		2	2
Opening Factor 1	dimensionless	0	0
Discharge Coefficient for Opening Factor 1	dimensionless	0,001	0,001
Width Factor for Opening Factor 1	dimensionless	0	0
Height Factor for Opening Factor 1	dimensionless	0	0
Start Height Factor for Opening Factor 1	dimensionless	0	0
Opening Factor 2	dimensionless	1	1
Discharge Coefficient for Opening Factor 2	dimensionless	1	1
Width Factor for Opening Factor 2	dimensionless	1	1
Height Factor for Opening Factor 2	dimensionless	1	1
Start Height Factor for Opening Factor 2	dimensionless	0	0

Figura 23 – Campo de seleção *AirflowNetwork: Multi Zone Component Detailed Opening*.

### 3.2.6.3. Implementação dos Extratores

Inicialmente é necessário criar estes equipamentos e especificar as suas características. Assim surgem os dois equipamentos mecânicos criados no campo *Fan:ZoneExhaust* dentro do grupo das ventoinhas.

Neste campo é necessário, antes de mais, designar os equipamentos. De seguida são especificados os horários pelos quais estes se regem. Assim considerou-se que a ventoinha da casa de banho estará a funcionar sempre que a zona estiver a ser utilizada, ou seja, tem horário de funcionamento igual ao de ocupação. O exaustor localizado na cozinha funciona constantemente ao longo de todo o dia.

Foi considerada uma eficiência energética de 100% e um aumento de pressão de 100 Pa para ambos os equipamentos mecânicos de extração de ar, sendo estes valores os aconselhados pelo programa. É neste campo em que é definido o máximo caudal de funcionamento dos sistemas mecânicos de extração de ar. O caudal do exaustor é de 0,0167 m<sup>3</sup>/s ao longo do dia que corresponde a 60 m<sup>3</sup>/h. O caudal máximo de funcionamento da ventoinha instalada na casa de banho é também de 60 m<sup>3</sup>/h, que tal como já foi referido, é ligada somente durante os períodos de ocupação. Neste campo são ainda definidos os nós interiores e exteriores das ventoinhas criadas, que são designados pelo programa de *inlet nodes* e *outlet nodes*.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		Zone3 Exhaust Fan	Zone1 Exhaust Fan
Availability Schedule Name		sch_VentConstante	sch_ocupação_Z1
Fan Efficiency		1	1
Pressure Rise	Pa	100	100
Maximum Flow Rate	m3/s	0,0167	0,0167
Air Inlet Node Name		Zone3 Exhaust Node	Zone1 Exhaust Node
Air Outlet Node Name		Zone 3 Return Node	Zone 1 Return Node
End-Use Subcategory		exaustor cozinha	ventoinha wc

Figura 24 – Campo de seleção *Fan Zone Exhaust*.

Após a criação dos equipamentos mecânicos é necessário inseri-los na zona térmica pretendida, e relacionar corretamente os nós formados pelo programa. Surge assim a necessidade de recorrer aos campos *ZoneHVAC:EquipmentList* e *ZoneHVAC:EquipmentConnections*. Nestes campos é realizada a correlação entre os equipamentos mecânicos e as zonas em que eles se inserem, e não são usadas mais opções destes campos pois não se pretende inserir um sistema AVAC, apesar de esta ser uma das grandes potencialidades do programa EnergyPlus.

Field	Obj1	Obj2
Name	Z3-Cozinha e Lavandaria	Z1-Casa de Banho
Zone Equipment 1 Object Type	Fan:ZoneExhaust	Fan:ZoneExhaust
Zone Equipment 1 Name	Zone3 Exhaust Fan	Zone1 Exhaust Fan
Zone Equipment 1 Cooling Sequence	1	1
Zone Equipment 1 Heating or No-Load Sequence	1	1

Figura 25 – Campo de seleção *Zone HVAC Equipment List*.

Field	Obj1	Obj2
Zone Name	Z3-Cozinha e Lavandaria	Z1-Casa de Banho
Zone Conditioning Equipment List Name	Z3-Cozinha e Lavandaria	Z1-Casa de Banho
Zone Air Inlet Node or NodeList Name		
Zone Air Exhaust Node or NodeList Name	Zone3 Exhaust Node	Zone1 Exhaust Node
Zone Air Node Name	Zone 3 Node	Zone 1 Node
Zone Return Air Node Name	Zone 3 Return Node	Zone 1 Return Node

Figura 26 – Campo de seleção *Zone HVAC Equipment Connections*.

Para integrar os equipamentos mecânicos no modelo *AirflowNetwork* recorre-se ao campo *AirflowNetwork:Multizone:Component:ZoneExhaustFan*. Neste campo são definidos os equipamentos existentes, e especificados parâmetros de ventilação para a situação de desligados. Quando estão desligados, o programa considera-os como pequenas aberturas e, como tal, que existe trocas de ar entre o interior e o exterior através das pequenas aberturas existentes.

Assim sendo, no presente campo *AirflowNetwork:Multizone:Component:ZoneExhaustFan* juntamente com os dados definidos no campo *AirflowNetwork:ReferenceCrackConditions*, são estabelecidos os parâmetros base para a consideração dos equipamentos mecânicos pelo programa no modelo *AirflowNetwork*.

Surgem de seguida os exemplos de inserção dos dados no programa:

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		Zone3 Exhaust Fan	Zone1 Exhaust Fan
Air Mass Flow Coefficient When the Zone Exhaust Fan is Off at Reference	kg/s	0,00000001	0,00001
Air Mass Flow Exponent When the Zone Exhaust Fan is Off	dimensionless	0,65	0,65
Reference Crack Conditions		ventoinhas off	ventoinhas off

Figura 27 – Campo de seleção *AirflowNetwork: Multi Zone Component Zone Exhaust Fan*.

Field	Units	Obj1
Name		ventoinhas off
Reference Temperature	C	20
Reference Barometric Pressure	Pa	101325
Reference Humidity Ratio	kg/kg	0

Figura 28 – Campo de seleção *AirflowNetwork: Multi Zone Reference Crack Conditions*.

Quando uma ventoinha está desligada, o fluxo de ar na abertura considerada pelo programa é em função da diferença de pressão existente entre o interior e o exterior. Assim, neste caso o fluxo de ar é traduzido pela seguinte formula [12], [17]:

$$Q = (\text{Crack Factor}) * C_T * C_Q * \Delta P^n \quad (14)$$

Onde,

$Q$  – fluxo de ar [kg/s];

$C_T$  – fator de ponderação da transferência de calor sensível [adimensional];

$C_Q$  – coeficiente do fluxo de ar. Este valor corresponde ao valor inserido na opção *Air Mass Flow Coefficient When the Zone Exhaust Fan is Off at Reference Conditions* [kg/s.Pa];

$\Delta P$  – diferencial de pressão [Pa];

#### 3.2.6.4. Nós Exteriores e Coeficientes de Pressão do Vento

No campo *AirflowNetwork:Multizone:ExternalNode* são definidos os nós exteriores existentes, ou seja, como existem seis janelas mais duas ventoinhas e mais quatro grelhas, foram portanto criados doze nós exteriores. Para cada nó é especificada a sua altura que, neste caso, se considerou a metade da altura da fachada. Foram ainda relacionados os coeficientes de pressão do vento a que cada um dos nós está sujeito, através da última opção *Wind Pressure Coefficient Values Object Name*, que remete os dados anteriores para as listas de coeficientes de pressão do vento criadas.

Field	Units	Obj2	Obj3	Obj4
Name		Parede Exterior Sala	Parede Exterior Cozinha	Parede Exterior Q1
External Node Height	m	9,625	9,625	9,625
Wind Pressure Coefficient Values Object Name		coeficientes de pressao 2	coeficientes de pressao 2	coeficientes de pressao 1

Figura 29 – Campo de seleção *AirflowNetwork MultiZone External Node*.

Os coeficientes de pressão do vento são criados através dos campos *AirflowNetwork:Multizone:WindPressureCoefficientArray* e *AirflowNetwork:Multizone:WindPressureCoefficientValues*. Nestes campos são definidas as direções dos coeficientes de vento, bem como os respetivos valores dos coeficientes a que cada direção está sujeita. O valor da pressão do vento está presente no ficheiro meteorológico retirado do site do programa, sendo que estes coeficientes são simplesmente fatores corretivos aos valores que provêm do ficheiro. Assim sendo, os valores inseridos no programa resultam do estudo do Eurocódigo 1 bem como do manual do programa.

Field	Units	Obj1
Name		cada 90 graus
Wind Direction 1	deg	0
Wind Direction 2	deg	90
Wind Direction 3	deg	180
Wind Direction 4	deg	270

Figura 30 – Campo de seleção AirflowNetwork Multi Zone Wind Pressure Coefficient Array.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		coeficientes de pressao 1	coeficientes de pressao 2
AirflowNetwork:MultiZone:WindPressureCoefficientArray		cada 90 graus	cada 90 graus
Wind Pressure Coefficient Value 1	dimensionless	0,7	-0,2
Wind Pressure Coefficient Value 2	dimensionless	-0,5	-0,5
Wind Pressure Coefficient Value 3	dimensionless	-0,2	0,7
Wind Pressure Coefficient Value 4	dimensionless	-0,5	-0,5

Figura 31 – Campo de seleção AirflowNetwork Multi Zone Wind Pressure Coefficient Values.

Optou-se como se pode constatar, por considerar 4 tipos de direções de pressão do vento, para cada uma das duas fachadas exteriores sujeitas à ação do vento, resultando para cada fachada, como se pode observar no esquema que segue, quatro possíveis efeitos de ação do vento sujeitos aos coeficientes exibidos na imagem anterior:

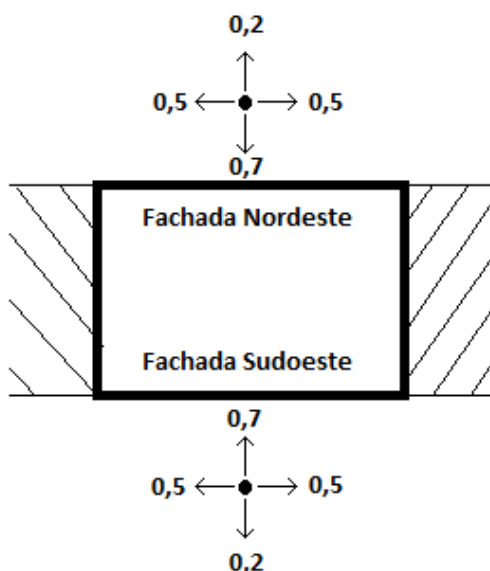


Figura 32 – Esquema de distribuição dos coeficientes de pressão do vento para ambas as fachadas do apartamento.

### 3.2.7. MODELAÇÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO

Para usar este método de cálculo no EnergyPlus é necessário recorrer ao campo *ZoneAirContaminantBalance* e introduzir no primeiro campo a opção *yes*, para que o programa calcule os níveis de CO<sub>2</sub>. É necessário também atribuir um valor ao nível de dióxido de carbono existente no exterior através da criação de um Schedule. O valor utilizado foi de 380 partes por milhão, valor proveniente de uma base de dados da organização americana NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*).

Field	Units	Obj1
Carbon Dioxide Concentration		Yes
Outdoor Carbon Dioxide Schedule Name		sch_co2

Figura 33 – Campo de seleção *Zone Air Contaminant Balance*.

Field	Obj1
Name	sch_co2
Schedule Type Limits Name	any number
Field 1	Through:12/31
Field 2	For:alldays
Field 3	Until:24:00
Field 4	380

Figura 34 – Campo de seleção *Schedule Compact*.



## 4

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE  
PARÂMETROS DE CÁLCULO

## 4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações realizadas. Em primeiro lugar efetua-se a comparação entre os dois modelos de transferência de calor e de humidade EMPD e HAMT. De seguida realiza-se uma comparação dos valores obtidos nas simulações (através dos modelos previamente mencionados sujeitos a um valor de  $R_{ph}$  constante), com os valores provenientes da aplicação do modelo AirflowNetwork. Para melhor compreender o funcionamento do modelo AirflowNetwork é realizada neste capítulo uma análise de sensibilidade, onde se estuda a influência de diversos parâmetros no modelo.

## 4.2. COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E HUMIDADE

## 4.2.1 EMPD

O modelo pode ser aplicado como já foi referido anteriormente, através da opção *Moisture Penetration Depth Conduction TransferFunction*. Sendo este um modelo de simulação da difusão de calor e de armazenamento de humidade é necessário caracterizar algumas propriedades dos materiais aplicados.

As propriedades exigidas pelo programa são: a rugosidade, a espessura, a condutibilidade térmica, a densidade e o calor específico. Estas propriedades são inseridas no campo *Material* como se demonstra na figura 35.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7
Name		Tijolo Face à vista	reboco 2 cm	Tijolo Vazado 11	betão 25 cm	Tijolo Vazado 7	betão 20 cm	reboco 1.5 cm
Roughness		VeryRough	Rough	Rough	VeryRough	Rough	Rough	Rough
Thickness	m	0.11	0.02	0.11	0.25	0.07	0.2	0.015
Conductivity	W/m-K	0.861	0.8	0.42	1.373	0.42	1.373	0.8
Density	kg/m3	1788	1900	900	2104	900	2104	1900
Specific Heat	J/kg-K	868	850	850	776	850	776	850
Thermal Absorptance		0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Solar Absorptance		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Visible Absorptance		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

Figura 35 – Campo de seleção *Material*.

O modelo EMPD considera uma camada na superfície interior com espessura  $\delta_M$ , a camada escolhida deve ser constituída pelo material com maior influência na inércia higroscópica. No presente caso de estudo, o material com maior inércia higroscópica é o reboco interior.

Para que a simulação possa decorrer, é necessário ainda quantificar [11]:

- A espessura  $\delta_M$ ;
- Os coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  da curva de adsorção do material higroscópico.

Os valores utilizados provêm da tese de Costa, H., 2012 [11] pois os materiais utilizados na construção do apartamento da presente dissertação são idênticos aos materiais utilizados no apartamento do referido trabalho. Assim sendo, de seguida é exemplificada a forma como se introduziu os dados no programa EnergyPlus no campo *MaterialProperty:MoisturePenetrationDepth:Settings*.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		reboco 2 cm	reboco 1.5 cm
Moisture Penetration Depth	m	0,0025	0,0025
Moisture Equation Coefficient a	dimensionless	0,0418	0,0418
Moisture Equation Coefficient b	dimensionless	1,5173	1,5173
Moisture Equation Coefficient c	dimensionless	0	0
Moisture Equation Coefficient d	dimensionless	1	1

Figura 36 – Campo de seleção *Material Property Moisture Penetration Depth Settings*.

#### 4.2.2 HAMT

Para aplicar este modelo é necessário selecionar o algoritmo *Combined Heat And Moisture Finite Element* no campo *HeatBalanceAlgorithm*. Este modelo combina os efeitos da transferência de calor e humidade através dos materiais existentes; sendo um modelo mais complexo que o EMPD, a base de dados necessária para se simular o caso em estudo é bastante superior. Para este modelo é preciso caracterizar todos os materiais, ao contrário do modelo EMPD. As propriedades necessárias para o programa simular com sucesso o apartamento foram referidas no capítulo 2.

Os dados utilizados para preencher os campos necessários do programa provêm novamente da tese [11]. Somente é apresentada alguma da informação inserida no programa para este modelo HAMT, que tal como já foi citado requer uma vasta informação para o seu funcionamento. A restante informação referente a este modelo HAMT, encontra-se detalhadamente representada e descrita na tese já referida. Nas figuras 37 e 38 apresenta-se alguma informação inserida no programa.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Material Name		Tijolo Face à vista	reboco 2 cm	reboco 1.5 cm	betão 25 cm	betão 20 cm
Porosity	m3/m3	0,35	0,24	0,24	0,22	0,22
Initial Water Content Ratio	kg/kg	0,001102	0,018421	0,018421	0,039116	0,039116

Figura 37 – Campo de seleção *Material Property Heat And Moisture Transfer Settings*.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Material Name		Tijolo Face à vista	reboco 2 cm	reboco 1.5 cm	betão 25 cm	betão 20 cm
Number of Isotherm Coordinates		17	9	9	7	7
Relative Humidity Fraction 1	dimensionless	0	0	0	0	0
Moisture Content 1	kg/m3	0	0	0	0	0
Relative Humidity Fraction 2	dimensionless	0.328	0.5	0.5	0.065	0.065
Moisture Content 2	kg/m3	0.91	30	30	25.5	25.5
Relative Humidity Fraction 3	dimensionless	0.432	0.8	0.8	0.113	0.113
Moisture Content 3	kg/m3	1.32	45	45	29.6	29.6
Relative Humidity Fraction 4	dimensionless	0.576	0.9	0.9	0.329	0.329
Moisture Content 4	kg/m3	1.91	65	65	46.1	46.1
Relative Humidity Fraction 5	dimensionless	0.752	0.99	0.99	0.582	0.582
Moisture Content 5	kg/m3	2.36	95	95	80.1	80.1
Relative Humidity Fraction 6	dimensionless	0.843	0.999	0.999	0.754	0.754
Moisture Content 6	kg/m3	2.46	110	110	101	101
Relative Humidity Fraction 7	dimensionless	0.9	0.9995	0.9995	1	1
Moisture Content 7	kg/m3	2.81	140	140	144	144
Relative Humidity Fraction 8	dimensionless	0.96	0.9999	0.9999		
Moisture Content 8	kg/m3	3.28	200	200		
Relative Humidity Fraction 9	dimensionless	0.969	1	1		
Moisture Content 9	kg/m3	4.12	210	210		
Relative Humidity Fraction 10	dimensionless	0.9897				
Moisture Content 10	kg/m3	30.2				
Relative Humidity Fraction 11	dimensionless	0.997				
Moisture Content 11	kg/m3	58.8				
Relative Humidity Fraction 12	dimensionless	0.9978				
Moisture Content 12	kg/m3	81.1				
Relative Humidity Fraction 13	dimensionless	0.9985				
Moisture Content 13	kg/m3	100				
Relative Humidity Fraction 14	dimensionless	0.9993				
Moisture Content 14	kg/m3	210				

Figura 38 – Campo de seleção Material Property Heat And Moisture Transfer Sorption Isotherm.

#### 4.2.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Comparar-se-ão os resultados obtidos em ambos os modelos para os parâmetros temperatura interior ( $T_{int}$ ) e temperatura ponto de orvalho interior ( $T_{po}$ ).

É de salientar que foi considerado um regime de ventilação constante para as simulações, com o valor de uma renovação de ar por hora.

Após analisar o comportamento de todas as zonas para os parâmetros anteriormente referidos, constatou-se que o comportamento das zonas correspondentes à casa de banho, cozinha e sala é muito semelhante. E por sua vez o comportamento apresentado pelos três quartos existentes no apartamento também é semelhante entre eles, apesar de diferente do outro conjunto referido.

Deste modo apenas se exhibe o comportamento da sala e do Quarto 2, pois correspondem às zonas com maior importância na habitação. A sala devido à existência de um longo período de ocupação diário, e o quarto número 2 devido a ser um quarto duplo localizado no centro do apartamento com dois ocupantes no horário de ocupação.

##### 4.2.3.1. Temperatura Interior

O primeiro parâmetro a ser analisado é a temperatura interior a que cada zona está sujeita. Para estudar o comportamento mensal de cada zona foram utilizados dois indicadores estatísticos, são eles: a média e o percentil 90. Optou-se pelo uso do indicador percentil 90 pois o valor médio mensal pode ser um indicador estatístico que não represente bem a realidade para todas as situações. Deste modo cruzando a informação proveniente destes dois indicadores consegue-se um melhor entendimento e interpretações mais claras para os valores dos parâmetros que se pretendem estudar.

Com base nos 2 indicadores estatísticos utilizados surgem os gráficos nas figuras 39 e 40 para a zona 2, ou seja, a sala.

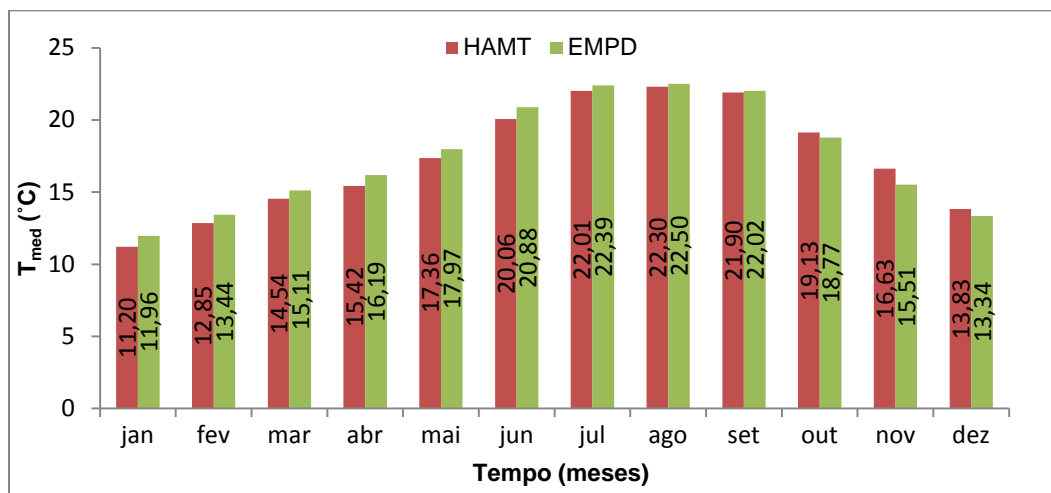


Figura 39 – Análise mensal da  $T_{med}$  na zona 2.

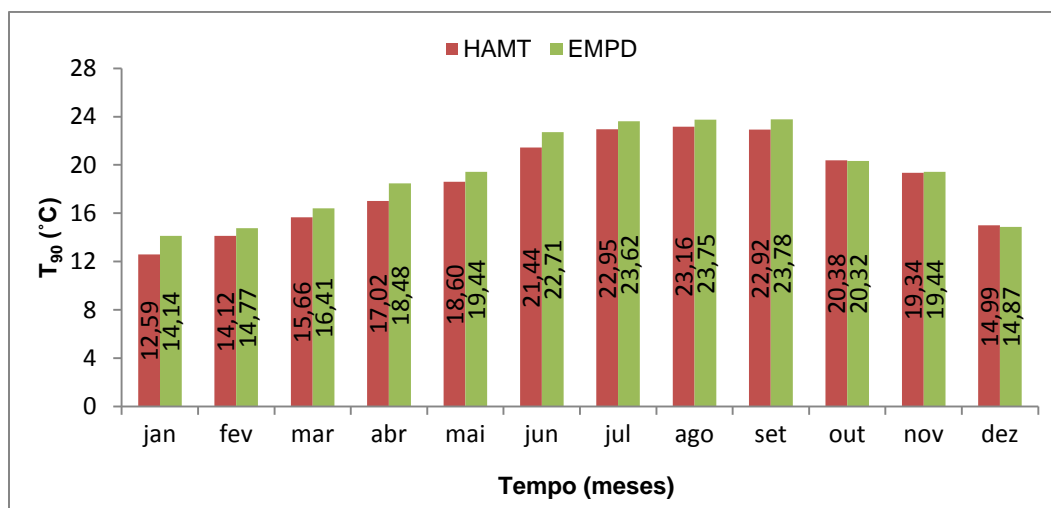


Figura 40 – Análise mensal da  $T_{90}$  na zona 2.

O modelo EMPD apresenta, regra geral, valores superiores ao modelo HAMT para as temperaturas médias mensais. Somente nos meses de Outubro, Novembro e Dezembro é que os valores da temperatura média provenientes do modelo HAMT superam os valores do modelo EMPD. Existe uma boa aproximação dos valores obtidos pelos dois modelos, sendo que a diferença de temperatura entre estes, não contabilizando o mês de Novembro, é sempre inferior a 1°C.

Analisando o gráfico com os valores do percentil 90 da temperatura mensal constata-se uma maior discrepância nos valores dos dois modelos, no entanto, a média das diferenças nos valores do percentil 90 da temperatura mensal é de somente 0,74°C.

Tal como já foi referido o comportamento das zonas 1 e 3 é muito semelhante ao da zona 2, sendo os valores da temperatura apresentado por estas zonas ligeiramente inferior ao da zona apresentada.

Estudando agora o comportamento dos quartos, voltados todos eles a sudoeste, mais concretamente do Quarto 2 o qual possui a designação alternativa de zona 5.

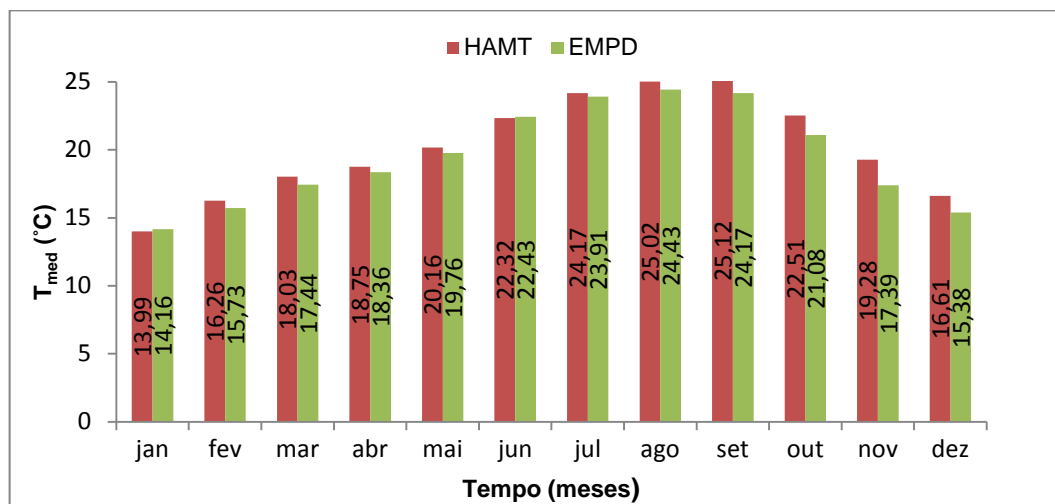


Figura 41 – Análise mensal da  $T_{med}$  na zona 5.

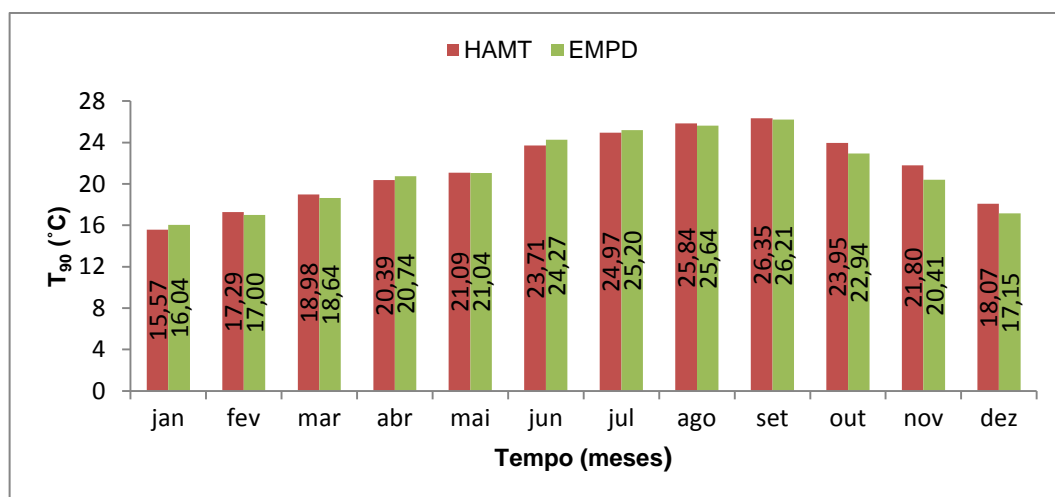


Figura 42 – Análise mensal da  $T_{90}$  na zona 5.

Analisando os gráficos das figuras 41 e 42, verifica-se que a temperatura nos quartos é superior à temperatura apresentada nos restantes compartimentos. Constata-se através do gráfico da temperatura média mensal que os valores provenientes do modelo HAMT são, regra geral, superiores aos valores com base no modelo EMPD. A justificação para esta ocorrência deve-se ao facto de o modelo HAMT ter em conta as trocas de calor latente associadas à transferência de humidade. Este facto torna-se mais evidente nos quartos, pois são os locais onde existe uma permanência diária de 8 horas pelos moradores. Foi ainda verificado que a diferença de temperaturas entre os dois modelos é inferior para a zona 6 (Quarto 3) do que para os outros dois quartos, devido à existência de um só ocupante no quarto.

Examinando o gráfico com os dados do percentil 90, ao contrário do verificado na sala, existe uma grande aproximação dos resultados provenientes dos dois modelos para os valores obtidos. Observou-se que:

- O valor médio do indicador  $P_{90}$  no modelo HAMT situa-se nos 21,5 °C, e para o modelo EMPD o valor médio do mesmo indicador é de 21,27 °C;
- A diferença média dos valores de percentil 90 mensal é de 0,5 °C, porém se não se tiver em conta os 3 últimos meses do ano, onde existe uma maior discrepância nos valores, a diferença média dos valores de  $P_{90}$  é inferior a 0,3°C.

O gráfico seguinte diz respeito à temperatura interior no quarto 2 durante o intervalo entre o dia 10 de Janeiro e o dia 15 de Janeiro.

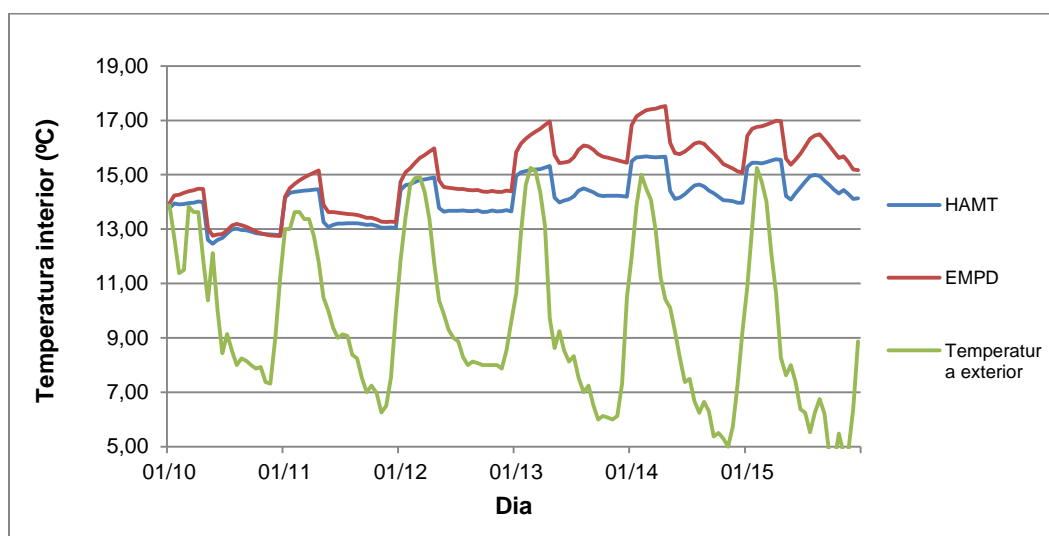


Figura 43 – Temperaturas registadas entre os dias 10 a 15 de Janeiro para a zona 5.

O gráfico da figura 43 permite uma análise mais pormenorizada dos dois modelos. Verifica-se que:

- O valor médio para a temperatura, durante o período em estudo, no modelo HAMT é de 15,1 °C e para o modelo EMPD é de 15,76 °C.
- A temperatura média exterior é de 9,63 °C;
- A diferença da temperatura interior entre os dois modelos é inferior a 1,6 °C em 90 % do período de 5 dias estudado;
- A maior diferença de temperatura entre os dois modelos é de 1,8 °C.

Conclui-se portanto que existe uma boa aproximação entre os dois modelos estudados.

Como se pode verificar, para as duas zonas apresentadas, ambos os modelos seguem a mesma tendência de aumento e diminuição da temperatura com base na temperatura exterior.

Em ambos os modelos, os meses com menores temperaturas são Dezembro, Janeiro e Fevereiro e os meses com temperaturas superiores são Junho, Julho e Agosto, tal como acontece normalmente com a temperatura exterior na cidade do Porto.

#### 4.2.3.2. Temperatura Ponto de Orvalho

Retirando partido das funcionalidades do programa, obtiveram-se os dados da temperatura interior e da humidade relativa interior, e a partir destes dois parâmetros foi possível calcular a temperatura ponto de orvalho ( $T_{po}$ ).

Somente se irá expor os dados para a temperatura ponto de orvalho para o compartimento sala, pois para este parâmetro todos os compartimentos da habitação têm um comportamento bastante semelhante. Assim sendo, surgem os valores médios mensais da temperatura ponto de orvalho para a sala, bem como os valores do indicador estatístico percentil 90 mensal para o mesmo parâmetro, nas figuras 44 e 45 respetivamente.

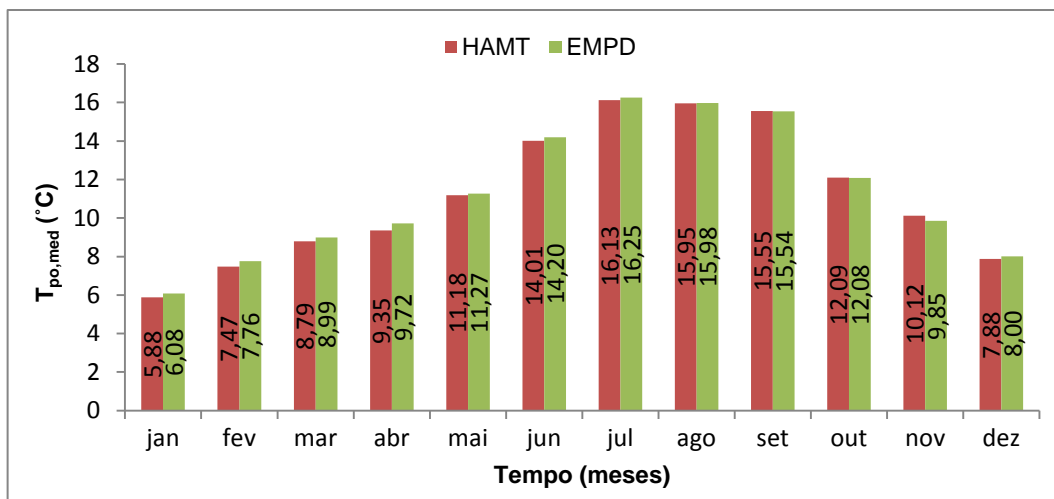


Figura 44 – Análise mensal da  $T_{po, med}$  na zona 2.

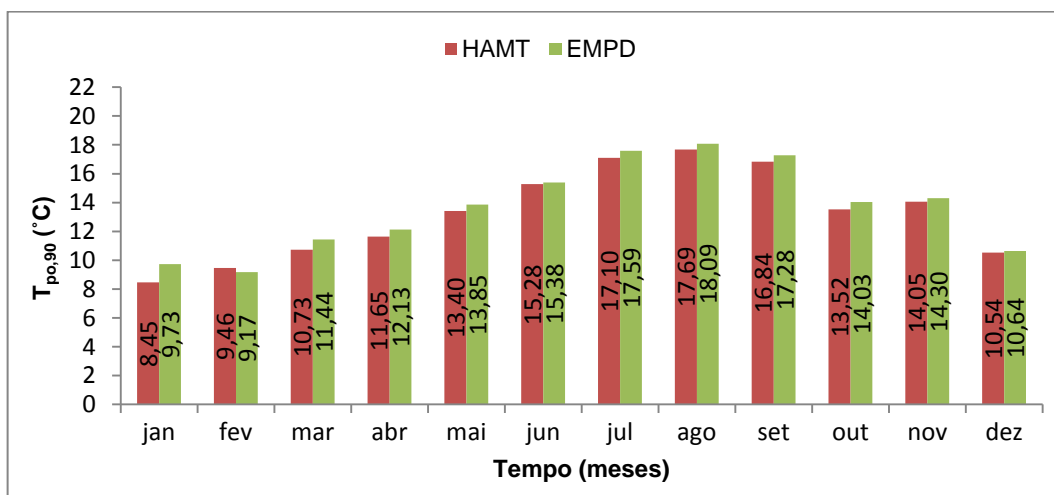


Figura 45 – Análise mensal da  $T_{po, 90}$  na zona 2.

Com base nos dois indicadores estatísticos utilizados, constata-se que:

- A maior diferença entre os resultados, dos dois modelos, da  $T_{po, med}$  ocorre no mês de Abril e é de somente 0,37°C;
- A média das diferenças entre os dois modelos para a  $T_{po, med}$  é de cerca de 0,16°C;

- A maior diferença entre os resultados, dos dois modelos, da  $T_{po,90}$  ocorre no mês de Janeiro e tem o valor de 1,27 °C;
- A média das diferenças entre os dois modelos para a  $T_{po,90}$  é de aproximadamente 0,46°C.

Em ambos os gráficos, não se verificam grandes discrepâncias entre os valores provenientes de cada modelo. Uma possível justificação para os valores da temperatura ponto de orvalho serem mais aproximados que os valores da temperatura interior resulta do facto de a humidade relativa ser uma das componentes do cálculo da temperatura ponto de orvalho. Em geral a temperatura interior é inferior no modelo HAMT, o que é compensado pelos valores de humidade relativa serem superiores. Deste modo, como o modelo HAMT tem em conta a componente de cálculo do calor latente produzido na zona, os valores tendem a aproximar-se nos dois modelos.

É ainda de saliente que o valor de temperatura ponto de orvalho mais elevado ocorre para o quarto 2, no mês de Julho, e tem o valor de 17,34°C e 17,56°C respetivamente para o modelo HAMT e EMPD.

Comparando agora os resultados obtidos na presente dissertação com os resultados do trabalho de Costa, H. 2012 [11] que, tal como já foi referido, realizou um estudo semelhante para um apartamento T1. Na tabela 3 são exibidos os valores médios anuais da temperatura interior e da temperatura ponto de orvalho interior para ambos os apartamentos.

De referir que existe uma diferença na localização dos dois apartamentos. O apartamento da presente dissertação situa-se na zona central do bloco 14, porém o apartamento T1 com o qual se pretende realizar a comparação situa-se na zona final do bloco 12.

Tabela 3 – Comparação dos resultados para os parâmetros  $T_{med}$  e  $T_{po}$  num quarto.

Modelo	$T_{med}$ (°C)		$T_{po}$ (°C)	
	T1	T3	T1	T3
HAMT	19.1	20.2	11.9	12.5
EMPD	18.3	19.5	11.9	12.5

As temperaturas apresentadas para o quarto do apartamento T1 são ligeiramente inferiores às temperaturas apresentadas na presente dissertação para o quarto 2. A explicação para esta ligeira diferença de temperatura resulta quer do facto da dimensão do compartimento ser inferior no apartamento T3 quer do facto de os apartamentos se situarem em diferentes zonas, e deste modo possuírem diferentes exposições solares.

Analisando os valores da temperatura média, a diferença percentual entre os dois trabalhos para o modelo HAMT é de 0,057% enquanto no modelo EMPD é de 0,066%. Comparando agora os valores da temperatura ponto de orvalho dos dois trabalhos, constata-se que a diferença percentual entre os dois trabalhos é igual para ambos os modelos e tem o valor de 0,05%. Com base na semelhança de valores obtidos em ambos os trabalhos, consideram-se os resultados extremamente satisfatórios.

#### 4.3. AIRFLOWNETWORK

O estudo até aqui realizado no apartamento baseia-se numa premissa falível, que consiste em considerar que todo o apartamento está sujeito a uma ventilação uniforme, e que esta tem como valor de Rph de 1 h<sup>-1</sup>. Ao aplicar o método AirflowNetwork, que foi anteriormente explicado, surge a oportunidade de realizar uma simulação mais realista e tentar assim atingir valores mais fiáveis para os



parâmetros anteriormente estudados. Foi portanto desenvolvido um modelo com base no AirflowNetwork.

#### 4.3.1 APLICAÇÃO DO AIRFLOWNETWORK

A implementação do modelo assume que a ventilação existente no apartamento é realizada pelas grelhas presentes nos compartimentos principais e que existe uma ventoinha e um exaustor nos compartimentos de serviço, casa de banho e cozinha respetivamente. O modelo criado tem as seguintes características:

- A ventoinha da casa de banho funciona somente nas duas horas diárias que foram consideradas para os banhos, que são das 8 às 9 horas e das 21 às 22 horas. Esta possui um caudal de funcionamento de  $60 \text{ m}^3/\text{h}$ ;
- O exaustor localizado na cozinha funciona permanentemente ao longo do dia com um caudal contínuo de  $60 \text{ m}^3/\text{h}$ ;
- As janelas existentes na habitação permanecem fechadas a tempo inteiro, embora possuam uma ligeira permeabilidade, pouco significativa;
- As portas da habitação encontram-se fechadas porém permitem trocas de ar devido a possuírem uma permeabilidade significativa. Somente para a porta de entrada na habitação é que se considera que não existem trocas de ar; este tipo de portas tendem a ser bastantes estanques, e como a porta só está aberta quando entram ou saem ocupantes do apartamento, desprezou-se as trocas de ar entre as zonas caixa de escadas e interior do apartamento;
- As grelhas existentes nos compartimentos de serviço possuem uma área de  $48 \text{ cm}^2$  nos três quartos e  $96 \text{ cm}^2$  na sala.

Para o cálculo da transferência de calor e humidade foi escolhido o modelo EMPD. O objetivo deste subcapítulo, é a comparação entre os valores do modelo EMPD do anterior subcapítulo, em que existia uma renovação horária de  $1 \text{ h}^{-1}$ , com os valores deste novo modelo EMPD que conta com a integração do AirflowNetwork a controlar a ventilação existente no apartamento.

Surge assim, a figura 46 onde é representada a ventilação existente no apartamento para um dia aplicando o modelo AirflowNetwork. Como se pode constatar a ventilação é sempre inferior aos  $0,6 \text{ h}^{-1}$ , que consiste no valor recomendado de referência do RCCTE. [23]

O cálculo do valor das renovações horárias para a habitação foi realizado através do somatório dos caudais de infiltração no apartamento e dividido pelo volume total da habitação, seguindo assim, a fórmula base de cálculo do grau de ventilação de um espaço:

$$R_{ph} = \frac{\sum Q}{V} \quad (15)$$

Em que,

$R_{ph}$  - renovações de ar por hora [ $\text{h}^{-1}$ ];

$\sum Q$  – somatório dos caudais de infiltração num espaço [ $\text{m}^3/\text{h}$ ];

$V$  – volume total do espaço [ $\text{m}^3$ ];

Para confirmar os valores das renovações horárias de ar na habitação verificou-se que o valor total de infiltrações de ar na habitação, para um período do dia em que funciona somente o exaustor como meio de saída de ar da habitação, é de cerca de  $60\text{m}^3$  numa hora. Assim, o valor de ar admitido na habitação é semelhante ao valor que sai através do exaustor, confirmando-se deste modo a autenticidade dos valores utilizados.

Na figura 46 surge um gráfico com os valores de renovações horárias para um dia no apartamento. Observando o gráfico apercebemo-nos da fraca ventilação a que o apartamento está sujeito, onde nunca o valor de Rph na habitação ultrapassa os  $0,6\text{ h}^{-1}$ .

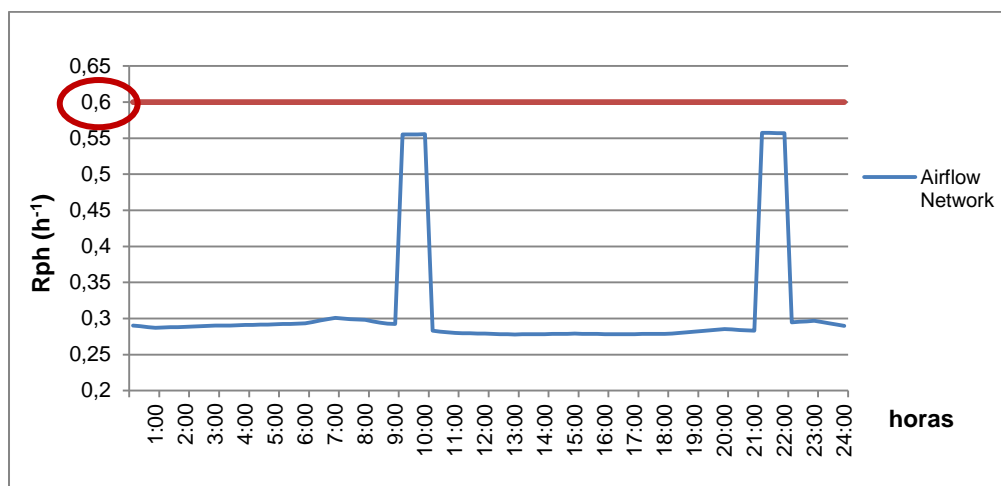


Figura 46 – Análise às renovações horárias de ar no apartamento.

Os picos que se podem constatar, entre os intervalos das 9 às 10 e das 21 às 22 horas, resultam do funcionamento da ventoinha existente na casa de banho, devido a serem os períodos atribuídos para os banhos. De resto a ventilação mantém-se, em geral, constante devido ao funcionamento do exaustor da cozinha.

Na figura 47 surgem os valores das renovações horárias para os diversos compartimentos da habitação num dia tipo.

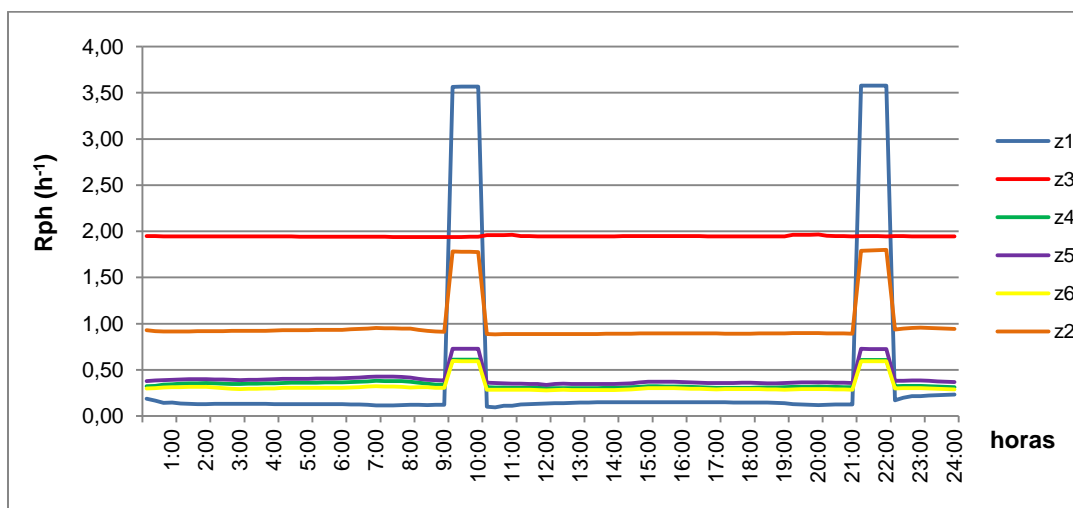


Figura 47 – Análise às renovações horárias de ar para cada compartimento da habitação.

Pode-se constatar que para os dois compartimentos de serviço os valores de Rph são inferiores aos  $4\text{ h}^{-1}$  aconselhados. A cozinha possui um Rph de  $2\text{ h}^{-1}$  ao longo do dia e a casa de banho nos períodos em

que está a ser utilizada supera os  $3,5h^{-1}$ . Assim apesar de os valores serem inferiores ao aconselhado, no caso da casa de banho a diferença é reduzida. A ventilação da casa de banho é muito reduzida quando a ventoinha não está ligada, o que pode ser explicado devido à reduzida permeabilidade da ventoinha quando esta está desligada.

Para os restantes compartimentos pode-se constatar que os quartos possuem na grande maioria do dia uma renovação horária de ar de cerca  $0,4h^{-1}$  enquanto a sala possui cerca de  $1h^{-1}$ . Sendo que o valor aconselhado para os compartimentos principais é de  $1h^{-1}$  conclui-se que a sala é corretamente ventilada porém os quartos deveriam possuir uma ventilação mais apropriada.

A ventilação na habitação em estudo, tendo em conta as condições anteriormente descritas para um período em que a ventoinha não se encontre em funcionamento, segue um esquema de ventilação semelhante à figura 48:

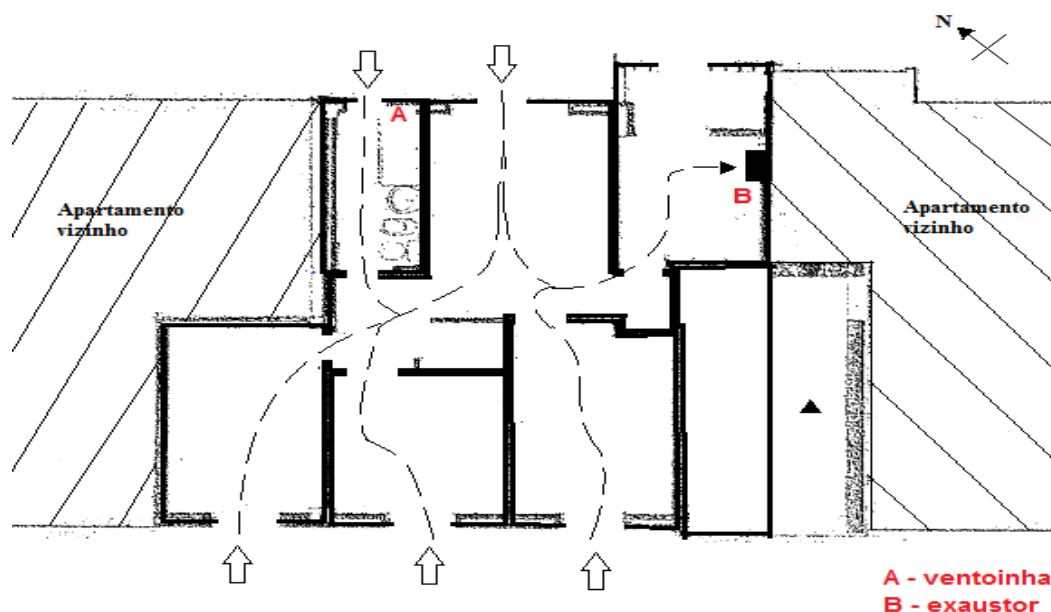


Figura 48 – Esquema dos fluxos de ar predominantes na habitação.

É importante referir que seria de prever que os gráficos das figuras 46 e 47 manifestassem resultados mais inconstantes. Os valores de Rph de uma zona deveriam possuir maior alternância, ao contrário do comportamento quase constante que apresentam. Porém as renovações horárias de ar dependem de fatores meteorológicos, entre os quais, o vento. O vento é simulado na habitação através de um ficheiro onde existem resultados de medições de vento de hora a hora. Verifica-se que a pouca precisão apresentada pelo modelo AirflowNetwork para simular a ação do vento corretamente, e deste modo resultarem valores de Rph mais apropriados, deve-se aos dados terem somente uma frequência horária.

Comparando os resultados do modelo AirflowNetwork desenvolvido com valores apresentados no trabalho de Ferreira, M. 2004 [21], onde se apresentam valores de caudais médios de admissão e evacuação para aberturas em fachadas. Verifica-se assim, que apesar de no trabalho anteriormente referido a abertura da área das grelhas ser superior na grande maioria de compartimentos, existem caudais de admissão de ar significativamente superiores aos apresentados na presente dissertação. Os caudais de admissão de ar apresentados na presente dissertação são muito inferiores ao previsto sendo que a este facto deve-se não só o modo como o efeito do vento é simulado na habitação mas também à pequena área atribuída as grelhas de cada compartimento bem como o reduzido caudal de extração de ar dos equipamentos mecânicos. Porém a presente dissertação pretende simular um caso de estudo

real, e portanto os valores utilizados para a área das grelhas e funcionamento dos equipamentos mecânicos de extração de ar são semelhantes aos existente no apartamento do bairro em estudo.

#### 4.3.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NO MODELO AIRFLOWNETWORK

Nesta fase realizar-se-á uma análise à variação dos resultados através da alteração de determinados parâmetros do modelo AirflowNetwork. São eles:

- Área de abertura das grelhas;
- Valor de referência do diferencial de pressão ( $\Delta P_r$ );
- Efeito da ventilação mecânica;
- Coeficientes de pressão do vento;
- Permeabilidade das janelas;
- Abertura das janelas.

Para estudar o efeito destas alterações analisam-se os novos valores de renovação horária e os níveis de  $\text{CO}_2$  no apartamento, sendo o período do estudo é coincidente com um dos meses mais frios do ano, Janeiro.

##### 4.3.2.1. Área de Abertura das Grelhas

Relativamente à área das grelhas criaram-se 3 situações para além da situação base. É de salientar que se eliminou a existência dos mecanismos de ventilação mecânica para este estudo, pois a presença da ventilação mecânica constante na cozinha e na casa de banho nos períodos de ocupação, condicionava os resultados finais relativamente aos fluxos de ar no apartamento. Verificou-se que, considerando a ventilação mecânica ligada, o aumento da área das grelhas até uma determinada área gerava um aumento de ventilação; porém, a partir de certo aumento da área das grelhas não existia qualquer aumento no grau de ventilação da habitação. Reduziu-se ainda a permeabilidade das janelas para valores muito reduzidos, de modo a que as frinchas em torno das janelas não influenciem a análise de sensibilidade. O objetivo neste primeiro ponto desta análise de sensibilidade, é somente estudar a influência da variação da área das grelhas no grau de ventilação da habitação.

Para duas das situações simuladas aumentou-se a área das grelhas e na terceira e última diminui-se significativamente. Estas situações criadas têm como objetivo permitir uma correta perceção de como variam os resultados com a alteração das áreas das grelhas. As áreas escolhidas para cada situação encontram-se descritas no quadro seguinte:

Tabela 4 – Situações desenvolvidas para estudar influência da área de abertura das grelhas.

Situação	Grelha Q1 [cm <sup>2</sup> ]	Grelha Q2 [cm <sup>2</sup> ]	Grelha Q3 [cm <sup>2</sup> ]	Grelha sala [cm <sup>2</sup> ]
Base	48	48	48	96
1	75	75	75	100
2	48	48	48	200
3	20	20	20	50

Com base na informação do quadro anterior foram calculados os valores das renovações de ar por horado apartamento, para cada situação. Apresenta-se de seguida na figura 49 os valores das renovações de ar por hora no quarto 1, que corresponde à zona 4.

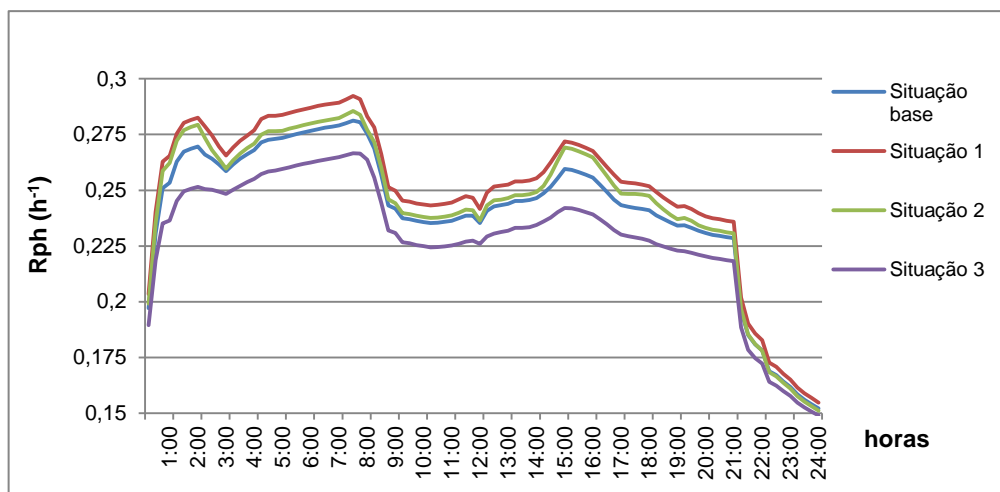


Figura 49 – Análise às renovações horárias de ar para zona 4, variando a área das grelhas.

Analisando o gráfico anterior, verifica-se que existe uma relação entre a área das grelhas e o caudal de entrada, tal como seria de prever ao analisar a equação 13, referente ao método de cálculo dos caudais nas grelhas. Um aumento da área da grelha implica um aumento da ventilação do compartimento e, por outro lado, uma diminuição da área da grelha implica a diminuição da ventilação. Apesar de a diferença de renovações de ar por hora para as várias situações ser reduzida, a situação 1 é aquela que apresenta melhor ventilação, isto devido ao aumento de área de todas as grelhas da habitação em relação à situação base. A situação 3 tal como seria de prever é a que apresenta piores níveis de ventilação. Após um estudo dos valores dos caudais de entrada para cada grelha, constata-se que através das grelhas presentes nos quartos Q1 e Q2 existe admissão de ar, na grelha presente na sala acontece saída de ar e através da grelha do Q3 ocorre, para a grande maioria do dia, saída de ar, sendo que durante breves momentos diários ocorre admissão de ar (caudal com valores bastante reduzidos). Assim sendo, o esquema de ventilação geral para as situações base, 1 e 3 é:

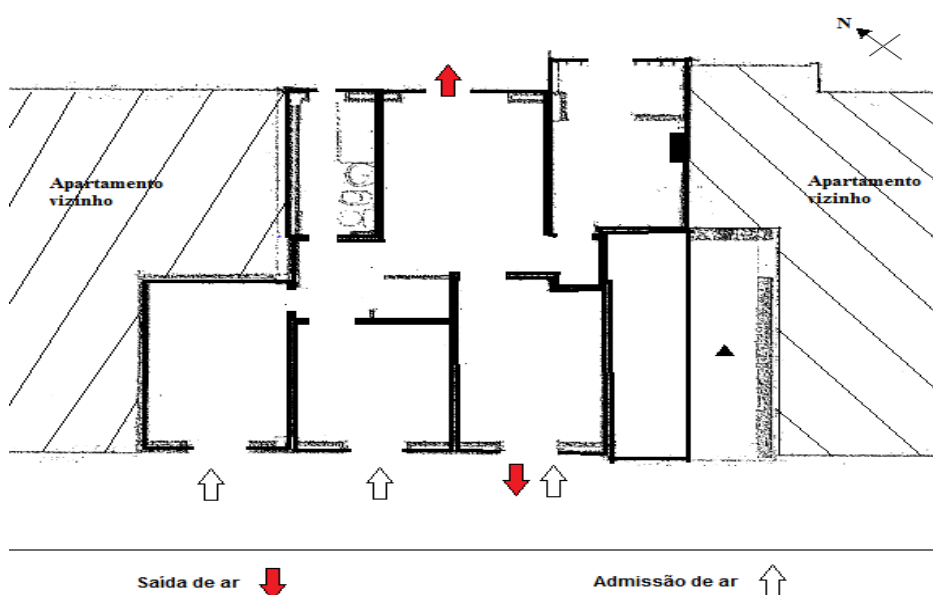


Figura 50 – Esquema dos sentidos dos fluxos de ar nas grelhas.

A situação 2 merece uma análise mais pormenorizada. A única diferença entre esta situação e a base é um aumento da área da grelha presente na sala de estar. No entanto, aumentando simplesmente a área da grelha da sala e analisando o caudal de entrada para cada grelha, constata-se que existe uma mudança no esquema de ventilação. A grelha do quarto 3 passa a admitir ar durante longos períodos diários, atingindo um caudal de  $1,8 \text{ m}^3/\text{h}$ . A justificação para este acontecimento deve-se ao equilíbrio que o sistema de ventilação da habitação tende a atingir. Como o sistema em estudo está somente sujeito a ventilação natural, o aumento da área de uma grelha de saída de ar (a fachada em que esta grelha se situa é a fachada onde ocorrem preferencialmente pressões negativas) possibilita uma maior saída de ar. Assim, para existir um equilíbrio entre o ar que entra na habitação e o ar que sai, a grelha do quarto 3 passa a admitir ar durante os períodos em que a ventilação natural favorece uma elevada saída de ar pela grelha da sala.

Na figura 51 surge um gráfico com a comparação do caudal de entrada para a grelha do quarto 3 na situação base e na situação 2, para um dia inteiro, onde é possível verificar o acontecimento descrito anteriormente. Quando o gráfico toma valores de  $0 \text{ m}^3/\text{h}$ , significa que está a ocorrer saída de ar pela grelha nesse período.

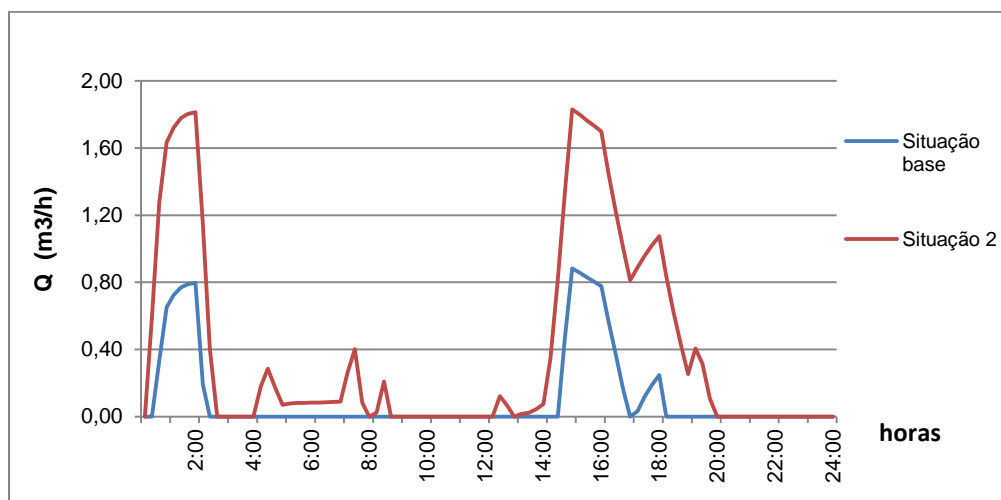


Figura 51 – Análise ao caudal de entrada na grelha do quarto 3.

Recorrendo a indicadores estatísticos para facilitar a análise da figura 51, verifica-se que:

- O caudal médio de entrada de ar na grelha na situação base é de  $0,11 \text{ m}^3/\text{h}$  e na situação 2 é de  $0,3911 \text{ m}^3/\text{h}$
- O valor do  $P_{90}$  de entrada de ar na grelha na situação base é de  $0,61 \text{ m}^3/\text{h}$  e na situação 2 é de  $1,54 \text{ m}^3/\text{h}$ .

#### 4.3.2.2. Valor de referência do diferencial de pressão ( $\Delta P_r$ )

Analisando a fórmula em que o programa se baseia para calcular o fluxo de ar que atravessa as grelhas, pode-se constatar que outro parâmetro com relevância é o valor de referência do diferencial de pressão ( $\Delta P_r$ ). Para estudar o comportamento das grelhas aquando da variação dos valores deste parâmetro, criaram-se 2 situações para além da situação base, e calcularam-se os valores de Rph. Utilizou-se um modelo igual ao modelo usado no ponto 4.3.3.1 pelas mesmas razões, ou seja, retirou-se a ventilação mecânica do apartamento e reduziu-se a permeabilidade das janelas.

Apresentam-se assim as situações desenvolvidas:

- Situação base –  $\Delta P_r = 20$  Pa;
- Situação 1 –  $\Delta P_r = 4$  Pa;
- Situação 2 –  $\Delta P_r = 40$  Pa.

Surge então de seguida o gráfico na figura 52 com os valores das renovações de ar horárias no quarto 1. Verifica-se que o parâmetro  $\Delta P_r$  tem reduzida influência nos valores finais das renovações horárias de um compartimento. Apesar de a diferença entre as várias situações ser reduzida, os valores obtidos estão de acordo com os valores que seriam de prever ao analisar a fórmula do fluxo de ar que atravessa uma grelha. A situação 1 sendo a que possui menor valor de  $\Delta P_r$  é a que apresenta melhores valores de renovações de ar por hora ao longo de todo o dia, já a situação 2, que possui um  $\Delta P_r$  superior, é a que apresenta piores valores de Rph como se pode constatar no gráfico seguinte:



Figura 52 – Análise às renovações horárias de ar para a zona 4, variando o parâmetro  $\Delta P_r$

#### 4.3.2.3. Efeito da ventilação mecânica

Nos dois pontos anteriores desta análise de sensibilidade foi alterado o modelo, retirando a ventilação mecânica, devido à influência que um sistema deste género possui numa habitação. Neste ponto, pretende-se estudar o efeito da extração mecânica no apartamento. Criam-se portanto três situações para além da situação base, em que para cada situação se altera a área das grelhas, pretendendo assim confirmar que até determinado aumento da área das grelhas existe um acréscimo no grau de ventilação da habitação; porém, a partir de certo aumento deixa de se verificar um incremento no grau de ventilação.

Desenvolveram-se as situações seguintes:

Tabela 5 – Situações desenvolvidas para estudar influência da área de abertura nas grelhas, com extração mecânica

Situações	Área das grelhas dos quartos [cm <sup>2</sup> ]	Área da grelha da sala [cm <sup>2</sup> ]
Situação base	48	96
Situação 1	75	100
Situação 2	100	150
Situação 3	150	200

A figura 53 traduz os níveis de CO<sub>2</sub> para a zona 4, que corresponde ao quarto 1. Uma análise a este parâmetro permite uma melhor percepção da qualidade da ventilação presente num edifício. Existe uma certa dificuldade em interpretar os valores nas unidades renovações de ar por hora (h<sup>-1</sup>), no entanto, analisando os níveis de CO<sub>2</sub> existentes num determinado edifício, torna-se mais claro e intuitivo compreender se a ventilação presente no edifício é a ideal.

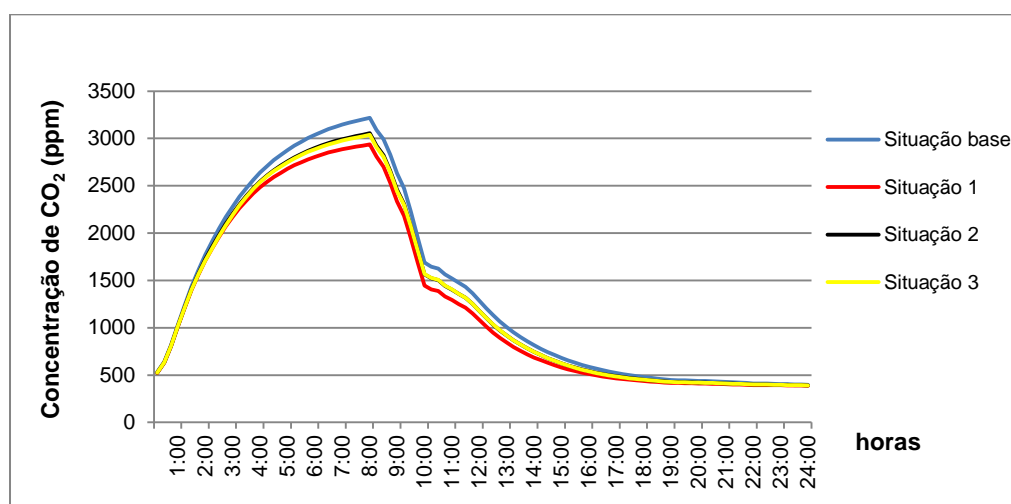


Figura 53 – Análise à concentração de CO<sub>2</sub> na zona 4

Como se pode verificar, através do aumento da área das grelhas da situação base para a situação 1 existiu um melhoramento no grau de ventilação do compartimento, consequentemente os níveis de dióxido de carbono diminuem. Porém, comparando a situação 1 com a situação 2, não se verifica um melhoramento do grau de ventilação, sendo que o número de renovações de ar por hora na situação 2 é inferior ao da situação 1, justificando assim o facto de os níveis de CO<sub>2</sub> serem superiores na situação 2. Realizando ainda outro aumento na área das grelhas atinge-se a situação 3, em que se efetuou um acréscimo considerável da área das grelhas. Os resultados desta situação são muito semelhantes aos da situação 2.

Considerando a extração mecânica ligada, o aumento do grau de ventilação não varia de forma linear com o aumento da área das grelhas, como seria de esperar ao analisar a fórmula de admissão de ar nas grelhas (equação 13). Somente até determinado aumento da área das grelhas é que se verifica um melhoramento da ventilação local. Conclui-se portanto que a extração mecânica condiciona fortemente os valores de admissão de ar na habitação.



#### 4.3.2.4. Coeficientes de Pressão do Vento

As abordagens estudadas anteriormente dizem respeito a propriedades das grelhas existentes na habitação; o aspeto a estudar neste ponto são os coeficientes de pressão do vento. O objetivo desta análise é observar como varia o grau de ventilação do apartamento alterando os valores dos coeficientes de pressão do vento. A situação base foi desenvolvida com base em valores provenientes do Eurocódigo 1, quanto às restantes situações, modificaram-se os valores dos coeficientes de modo a tentar analisar situações distintas.

Assim sendo, na tabela 6, surgem 3 situações desenvolvidas para além da situação base:

Tabela 6 – Situações desenvolvidas para estudar influência dos coeficientes de pressão do vento.

Situações	Fachada Sudoeste				Fachada Nordeste			
base	0,7	-0,5	-0,2	-0,5	-0,2	-0,5	0,7	-0,5
1	0,9	-0,3	-0,1	-0,3	-0,1	-0,3	0,9	-0,3
2	0,3	-0,3	-0,1	-0,3	-0,1	-0,3	0,3	-0,3
3	-0,7	0,5	0,2	0,5	0,2	0,5	-0,7	0,5

Calculando os valores das renovações horárias de ar na habitação surgem no gráfico da figura 54, os valores médios:

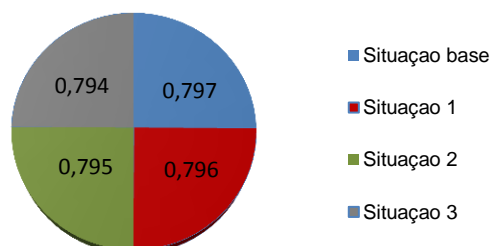


Figura 54 – Valor médio das renovações horárias de ar na habitação.

A variação dos valores dos coeficientes de pressão do vento não implica diferenças significativas nos valores das renovações de ar por hora do apartamento, considerando o sistema mecânico de extração de ar ativo. Como se pode observar no gráfico da figura 54 o valor médio de Rph para a habitação é muito semelhante em todas as situações.

#### 4.3.2.5. Permeabilidade das janelas

A permeabilidade das janelas é outro parâmetro com influência no grau de ventilação de uma habitação. Para analisar este parâmetro geraram-se 4 casos, incluindo a situação base. Para cada caso variou-se a permeabilidade das janelas existentes na habitação. As situações desenvolvidas são:

- Situação base – onde existe uma permeabilidade com o valor de 0,00035 kg/s para todas as janelas da habitação;
- Situação 1 – atribui-se uma permeabilidade de 0,0035 kg/s para todas as janelas da habitação;

- Situação 2 – atribui-se uma permeabilidade de 0,00035 kg/s para as janelas dos quartos e da sala e uma permeabilidade de 0,000035 kg/s para as restantes janelas;
- Situação 3 – atribui-se uma permeabilidade de 0,0035 kg/s para as janelas dos quartos e da sala e uma permeabilidade de 0,000035 kg/s para as restantes janelas.

A justificação para atribuir diferente permeabilidade às janelas das zonas de serviço, consiste na existência de mecanismos de ventilação mecânica nessas zonas. Constatou-se que através do aumento da permeabilidade das janelas nas zonas de serviço, a ventilação do apartamento era significativamente inferior. Nos compartimentos onde se situam os mecanismos elétricos de extração de ar, existem, tal como já foi referido, pressões negativas. A consequência da existência destas pressões negativas nestes compartimentos, leva a que um aumento da permeabilidade das janelas nestes compartimentos, se traduza num caudal de entrada, através das frinchas criadas pelo programa em torno da janela, superior ao caudal definido anteriormente para a permeabilidade das janelas no EnergyPlus (nas unidades kg/s.m).

Assim, verifica-se que quando se aumenta a permeabilidade das janelas, o número de renovações horárias de ar nos compartimentos de serviço (onde se situa a ventoinha e o exaustor) mantêm-se, embora a admissão de ar pelas grelhas distribuídas nos restantes compartimentos da habitação seja inferior. A justificação para esta ocorrência é que na situação base existia entrada de ar nas grelhas para compensar a saída de ar existente nos compartimentos de serviço (local de origem das pressões negativas), e deste modo manter-se um equilíbrio entre o ar que entra e o ar que sai. A partir do momento em que existe um aumento da permeabilidade das janelas na casa de banho e na cozinha, há um aumento de entrada de ar pelas aberturas em torno dessas janelas, o que condiciona a entrada de ar nas grelhas da habitação, a qual fica significativamente reduzida pois já não existe um desequilíbrio tao elevado no sistema de ventilação da habitação como acontecia para a situação base.

Neste ponto da análise de sensibilidade pretende-se estudar somente o efeito da variação da permeabilidade das janelas e não a sua relação com o funcionamento de sistemas mecânicos de extração de ar.

Calcularam-se os valores das renovações por hora para o apartamento, e obtiveram-se os seguintes resultados para as renovações de ar por hora de ar na zona 4:

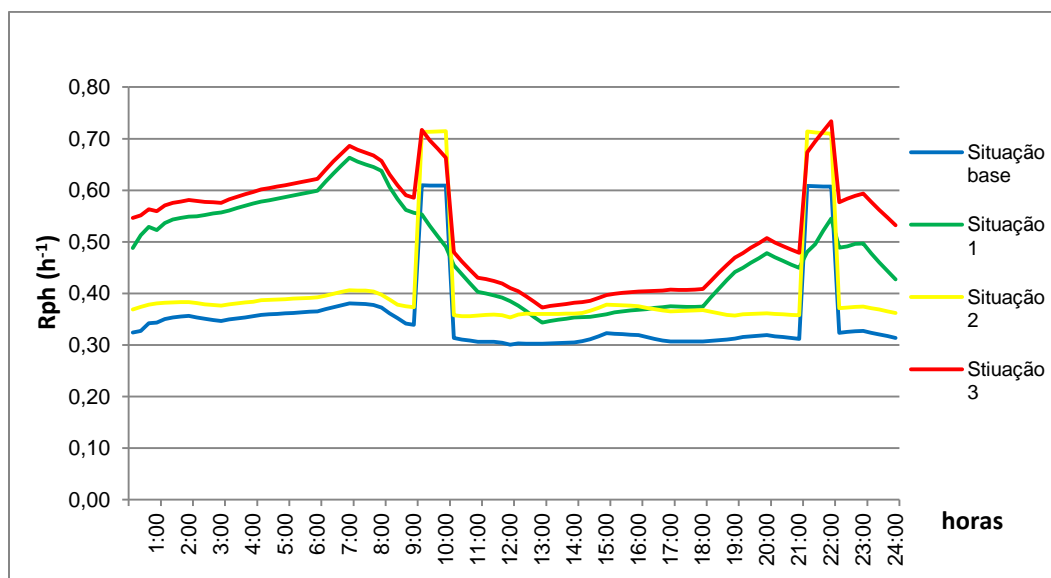


Figura 55 – Análise às renovações horárias de ar na zona 4, variando o parâmetro permeabilidade das janelas.

Nas situações desenvolvidas tentou-se simular casos diversificados. Na primeira situação foi aumentada a permeabilidade de todas as janelas da habitação, nos outros dois casos pretendia-se estudar a melhoria de ventilação quando se diminui a permeabilidade das janelas nos compartimentos de serviço.

Como se pode verificar, a situação base é aquela que apresenta piores resultados devido a ser a situação com menor permeabilidade. O aumento de permeabilidade de todas as janelas, como foi efetuado da situação base para a situação 1, tem como consequência um acréscimo significativo da permeabilidade. De salientar que se realizou um aumento muito elevado da permeabilidade de uma situação para a outra, para estudar casos extremos e demonstrar como este parâmetro pode ser relevante para o grau de ventilação de uma habitação.

A comparação entre a situação base e a situação 2 ou entre a situação 1 e a situação 3 permite exemplificar o acontecimento anteriormente descrito, onde uma diminuição da permeabilidade das janelas existentes nas zonas de serviço aumenta a ventilação geral da habitação.

A única diferença entre a situação 1 e 3 consiste numa redução da permeabilidade das janelas das zonas de serviço na situação 3. Verifica-se assim que o caudal de infiltração de ar no quarto é portanto superior para a situação 3, que confirma a importância de reduzir a permeabilidade das janelas nos compartimentos onde existe extração mecânica de ar. De salientar a elevada diferença de Rph nos períodos onde existe ativação da ventoinha da casa de banho (9 às 10 horas e 21 às 22 horas).

É de salientar ainda que através do aumento da permeabilidade das janelas a forma gráfica da linha que representa a tendência das renovações horárias ao longo do dia no edifício obtém uma forma mais semelhante a uma função sinusoidal. Conclui-se que nestas situações a ventilação do edifício está mais dependente do efeito do vento e, portanto toma uma forma mais inconstante.

Na figura 56 analisa-se a concentração de CO<sub>2</sub> no quarto 1, para cada situação, de modo a confirmar os valores das renovações horárias de ar. Os níveis de dióxido de carbono apresentados para as situações 1 e 2 são bastante elevados, devido à reduzida ventilação existente no compartimento, onde apenas durante dois períodos de duas horas diárias é que o valor de Rph ultrapassa os 0,5 h<sup>-1</sup>. Por outro lado, como seria de prever, com base no gráfico da figura 55, a situação 3 é a que apresenta menor concentração de CO<sub>2</sub>, pois possui uma ventilação mais apropriada que os restantes casos.

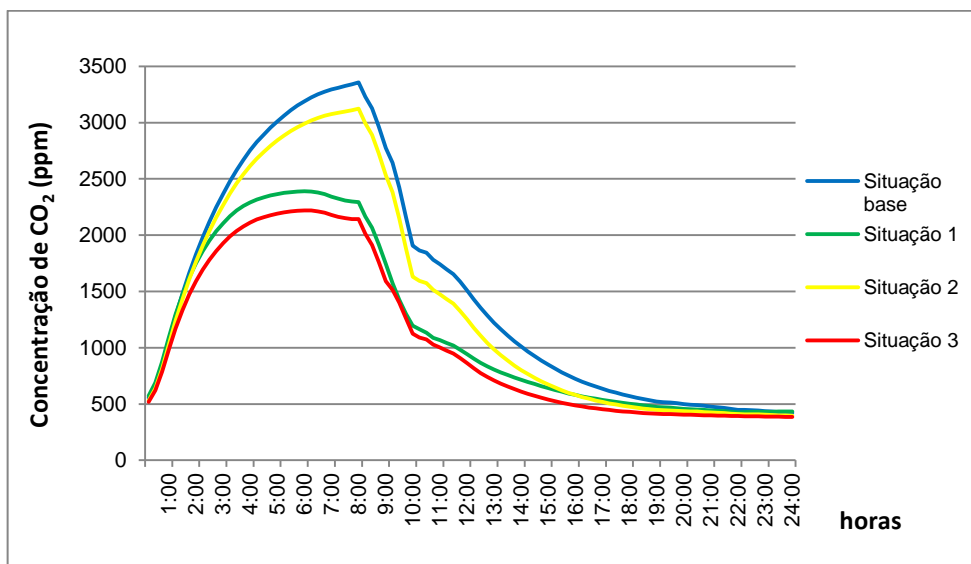


Figura 56 – Análise à concentração de CO<sub>2</sub> no quarto 1.

Em conclusão reduzindo a permeabilidade das janelas nos compartimentos de serviço atingem-se valores de Rph superiores, existindo consequentemente uma redução da concentração de dióxido de carbono. Observa-se assim que:

- Da situação base para a situação 2 a redução dos níveis de CO<sub>2</sub> atinge os 15%;
- Da situação 1 para a situação 3 a redução dos níveis de CO<sub>2</sub> atinge os 9%.

#### 4.3.2.6. Abertura das Janelas

Para melhorar a ventilação da habitação existe ainda a possibilidade de abrir e fechar as janelas do apartamento, sendo este o último parâmetro estudado nesta análise de sensibilidade. O programa oferece a funcionalidade de abrir determinadas janelas durante períodos de tempo escolhidos pelo utilizador, permitindo assim criar um sem número de situações possíveis. Nesta análise simularam-se 4 situações para além da situação base:

- Situação base – todas as janelas se mantêm fechadas ao longo do dia;
- Situação 1 - abertura de todas as janelas;
- Situação 2 – abertura somente das janelas dos quartos e da sala;
- Situação 3 – abertura somente das janelas dos quartos;
- Situação 4 – abertura somente das janelas dos quartos num período matinal das 9 às 13 horas.

O gráfico seguinte traduz os valores das renovações horárias de ar no apartamento, para as situações desenvolvidas:

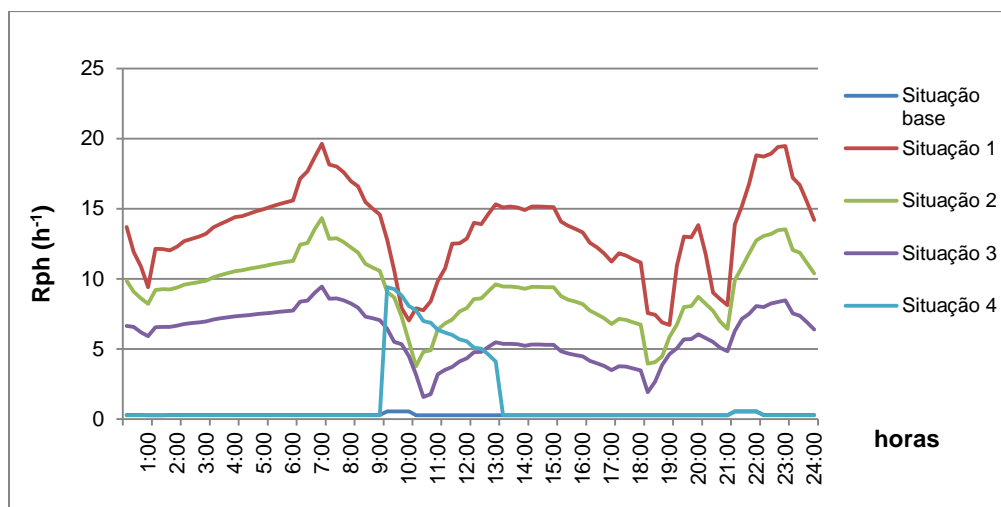


Figura 57 – Análise às renovações horárias de ar no apartamento, variando a abertura das janelas.

Verifica-se que a abertura de uma janela tem grande influência no grau de ventilação de uma habitação. Através da abertura das janelas ao longo de um dia inteiro, alcançam-se valores de renovações horárias de 20h<sup>-1</sup>. Ao longo das situações propostas diminui-se o número de janelas abertas ou o tempo de abertura das janelas na habitação, e consequentemente, como se verifica no gráfico, existe uma sucessiva diminuição nas renovações horárias de ar em cada situação.

Somente a situação base e a 4 é que são coerentes com o modo de atuação normal dos ocupantes de uma habitação em Portugal. Normalmente as janelas ou permanecem fechadas ao longo do dia, ou são abertas somente nos quartos num período matinal para renovar o ar resultante da ocupação noturna.

De seguida são analisados os níveis de CO<sub>2</sub> para cada situação para melhor compreender as consequências de valores de Rph elevados:

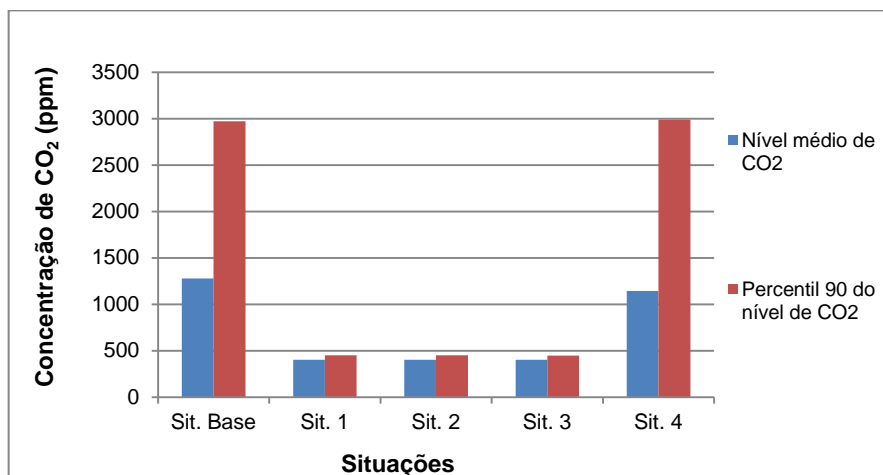


Figura 58 – Análise à concentração de CO<sub>2</sub> no quarto 1.

Pode-se constatar no gráfico anterior a grande diferença entre os níveis de dióxido de carbono para as situações onde existe abertura de janelas ao longo de todo o dia e para os restantes casos. A situação 3, que possui as janelas dos quartos constantemente abertas, apresenta valores de CO<sub>2</sub> muito reduzidos, sendo que o valor médio (401 ppm) é pouco superior ao nível de dióxido de carbono existente no ar do exterior da habitação. A situação 4 apresenta valores elevados para o indicador estatístico percentil 90, tendo em conta que possui um período de 4 horas com as janelas abertas. A justificação para este facto é que as janelas são abertas após o período de ocupação dos quartos, pelo que os níveis de dióxido de carbono só diminuem drasticamente a partir das 9 horas da manhã, período em que já não existe produção de CO<sub>2</sub> no interior do compartimento, embora tais níveis sejam significativamente elevados. Assim, não será de estranhar que o valor do percentil 90 da situação 4 seja semelhante ao valor da situação 1, e que o valor do nível médio de dióxido de carbono da situação 4 seja inferior ao da situação 1, o que se verifica.

#### 4.3.3 MODELO AIRFLOWNETWORK VS. VENTILAÇÃO CONSTANTE

Após a análise de sensibilidade que permitiu dominar melhor o funcionamento do modelo AirflowNetwork, e simular o apartamento de forma mais eficaz, efetuar-se-á uma comparação entre o modelo AirflowNetwork desenvolvido e o modelo EMPD apresentado no início do capítulo, que se encontra sujeito a um regime constante de ventilação de 1h<sup>-1</sup>.

##### 4.3.3.1. Dióxido de Carbono

Um parâmetro importante a estudar é a concentração de dióxido de carbono, pois este parâmetro facilita a interpretação dos resultados para as renovações de ar por hora de um compartimento.

Foram calculados para ambos os modelos os níveis de CO<sub>2</sub>. As zonas analisadas são o quarto 2 que para além de ser o quarto mais pequeno possui durante o período noturno 2 ocupantes, e a sala que é o principal compartimento de uma habitação.

O primeiro gráfico que surge diz respeito aos níveis de dióxido de carbono no quarto 2 para um período de 2 dias. Pode-se constatar que durante o período de ocupação da zona os níveis exibidos pelo modelo AirflowNetwork são superiores; porém, ao longo do dia tendem a assemelhar-se aos valores do modelo com ventilação constante. O facto de o quarto 2 possuir em geral uma ventilação de 0,5 h<sup>-1</sup> num modelo e 1h<sup>-1</sup> no outro é a causa para a diferença que se pode constatar no gráfico da figura 59. Ambas as curvas tendem para as 380 partes por milhão após o período de ocupação pois

este foi o nível de CO<sub>2</sub> considerado para o ar exterior. Durante o período das 3 às 9 horas os níveis de dióxido de carbono calculados no modelo com ventilação variável são muito elevados, sugerindo assim, que deveria existir uma melhor ventilação dos quartos, de modo a reduzir estas concentrações de CO<sub>2</sub> para valores mais adequados.

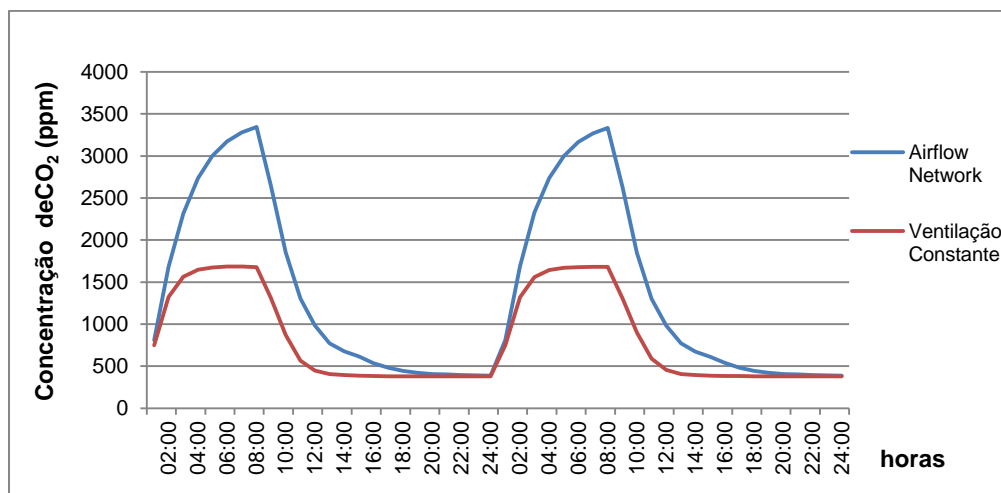


Figura 59 – Análise à concentração de CO<sub>2</sub> no quarto 2.

A figura 60 contém o gráfico que diz respeito aos níveis de dióxido de carbono da sala. Como se pode observar, existe um período diário onde os níveis de CO<sub>2</sub> são bastante superiores no modelo AirflowNetwork, sendo que durante esta altura do dia não existe qualquer ocupação da sala. Tendo em conta que neste compartimento, comparando diretamente com o modelo de ventilação constante, ambos possuem ao longo de quase todo o dia uma renovação horária de  $1\text{h}^{-1}$ , era de esperar que ambas as curvas fossem semelhantes. Porém, tendo em conta que o programa EnergyPlus considera a interação entre zonas, esta diferença de valores entre os dois modelos afigura-se mais coerente. Funcionando a sala como meio de ligação entre os quartos e as 2 zonas de serviço (que são a casa de banho e a cozinha) e sendo a ventilação nos quartos em média de cerca de  $0,5\text{h}^{-1}$ , bastante inferior à renovação de  $1\text{h}^{-1}$ . Torna-se evidente que no interior da habitação existirá um excedente de dióxido de carbono proveniente dos quartos que será extraído pelas zonas de serviço, tendo portanto a sala de receber em primeiro lugar o CO<sub>2</sub> proveniente dos quartos, e só depois o encaminhar para as zonas de extração de ar. Ficam assim justificadas as elevadas concentrações de dióxido de carbono existentes na sala durante o período de ocupação dos quartos.

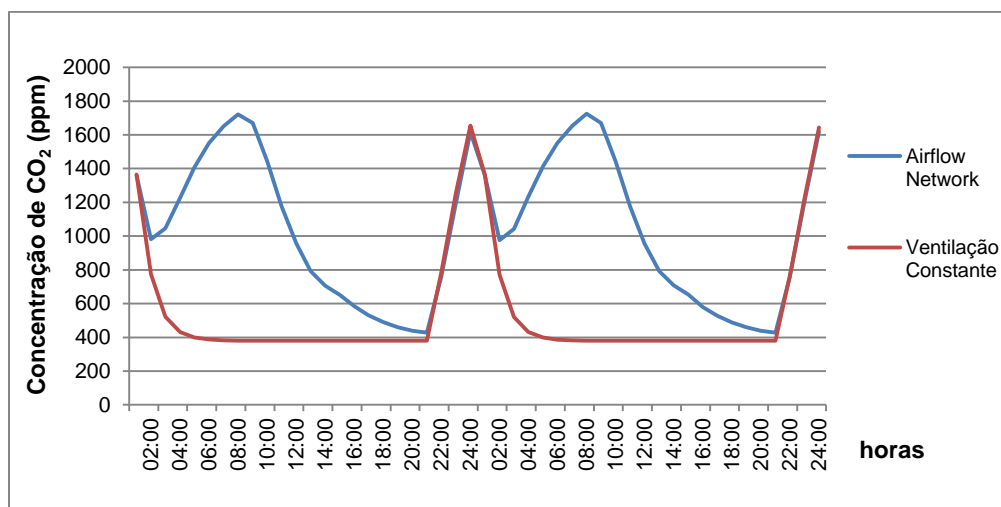


Figura 60 – Análise à concentração de CO<sub>2</sub> na sala.

#### 4.3.3.2. Produção de Vapor de Água

A produção de vapor de água será analisada na cozinha e na casa de banho, pois são os locais mais críticos. Na casa de banho durante o período de ocupação definido os ocupantes tomam banho. Sendo esta uma atividade que gera um elevado grau de vapor de água, é interessante analisar esta zona. Por outro lado, na cozinha, durante os períodos de ocupação cozinham-se as refeições, o que também gera um aumento na produção local de vapor de água, pelo que será outra zona interessante a analisar.

Em primeiro lugar comparam-se os valores da humidade relativa na casa de banho ao longo de um dia. Pode-se constatar na figura 61 que ambos os modelos possuem valores semelhantes ao longo do dia, exceto nos períodos de utilização do compartimento em que o modelo, que se baseia numa ventilação constante com valor igual a  $1\text{h}^{-1}$ , possui um valor bastante superior ao modelo AirflowNetwork. Analisando o gráfico da figura 47 percebe-se que a diferença existente entre as 9 e 10 horas e entre as 21 e 22 horas, é o resultado de no modelo AirflowNetwork existir uma renovação horária no compartimento durante esses períodos de cerca de  $3,5\text{h}^{-1}$ , renovação bastante superior à apresentada pelo modelo com ventilação constante que só apresenta  $1\text{h}^{-1}$ .

No modelo AirflowNetwork o maior valor alcançado para a humidade relativa é de 80%; em contrapartida, no modelo com ventilação constante, a humidade relativa atingiu os 90,2%. De salientar, que o valor máximo recomendado para a humidade relativa é de 80%, para não se criarem as condições ideais para a formação e proliferação de agentes patogénicos indesejados.

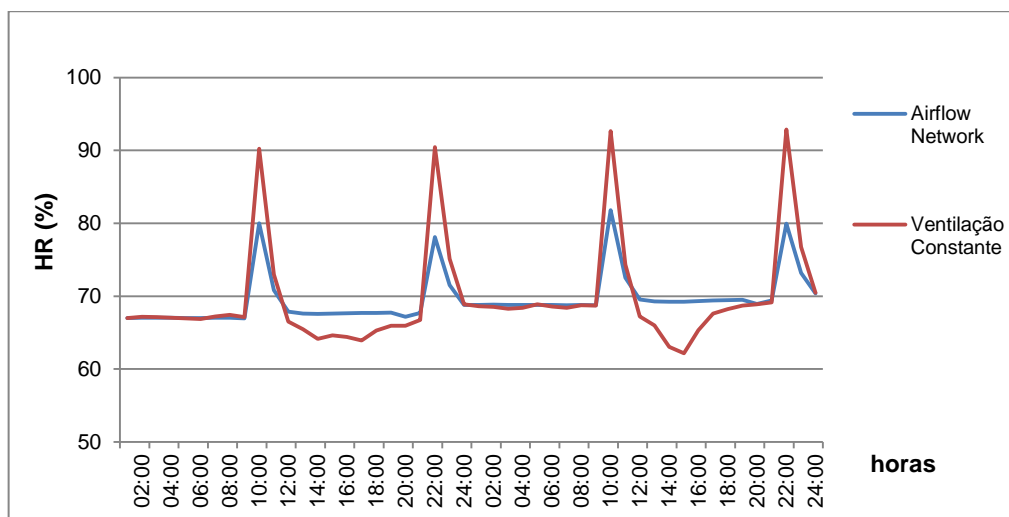


Figura 61 – Análise à HR na casa de banho.

A ventilação recomendada para uma zona de serviço é, normalmente, de 4 renovações horárias. Comparando os valores existentes nos dois modelos utilizados, claramente que no modelo com ventilação constante existe uma ventilação inadequada. Como resultado desta deficiente ventilação surgem valores muito altos para a humidade relativa. Sugeriria-se um aumento no grau de ventilação em ambos os modelos, para o compartimento em questão, especialmente para o modelo com ventilação constante, de modo a reduzir os valores existentes. Através da figura 61 compreende-se assim a importância em alcançar o valor recomendado de renovações de ar por hora para os compartimentos de serviço, que é tal como já foi referido de  $4\text{h}^{-1}$ .

De forma a melhor compreender a importância do sistema de ventilação mecânica existente na casa de banho, repetiu-se a simulação anterior, retirando a ventoinha existente na casa banho. Deste modo, a casa de banho encontra-se sujeita a níveis de ventilação reduzidos, inclusive durante o período de ocupação.

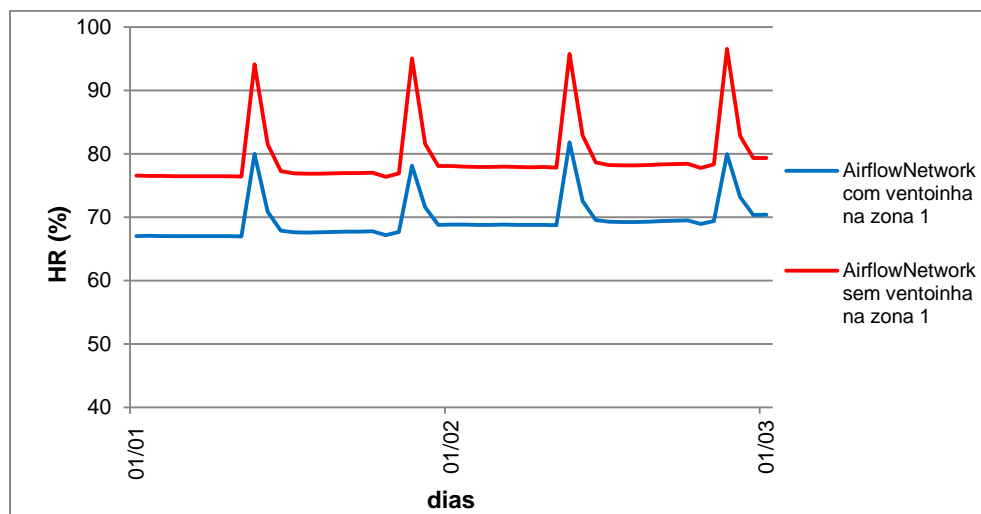


Figura 62 – Análise da influência da ventoinha na HR para os 3 primeiros dias de Janeiro.

Como se pode verificar pelo gráfico da figura 62, onde se apresentam os valores de humidade relativa para os três primeiros dias de Janeiro, a existência da ventoinha na casa de banho é fundamental pois reduz acentuadamente os valores da humidade relativa no compartimento em estudo. Analisando os valores do gráfico constata-se:

- No modelo sem ventoinha na casa de banho os valores da humidade relativa atingem os 97%;
- O valor médio da humidade relativa no modelo com ventoinha na casa de banho é de 69,58% e no modelo sem ventoinha o valor médio é de 79,36%;
- Verifica-se que existe um sucessivo aumento da humidade relativa nas duas situações, porém o aumento é mais evidente para o modelo sem ventoinha.

Analisando agora a variação da humidade relativa ao longo de um dia para a cozinha surge o gráfico na figura 63. Como se pode constatar os valores exibidos pelo modelo AirflowNetwork são inferiores ao modelo com ventilação constante. Mais uma vez a diferença entre os valores é resultado da diferença existente no grau de ventilação de cada modelo. No AirflowNetwork existe uma ventilação constante de duas renovações por hora, valor que apesar de ser somente metade do recomendado, não se prevêem problemas devido a valores elevados de humidade relativa, já que o máximo valor alcançado na cozinha para a humidade relativa é de cerca de 67%. Para o modelo com uma renovação horária constante ao longo de todo o dia o valor máximo alcançado é de cerca de 76.3%. Assim sendo, não antecipa problemas devido a valores elevados de humidade para qualquer um dos modelos. Apesar da reduzida ventilação nos períodos de ocupação, esta ventilação ocorre ao longo de todo o dia de forma quase constante para ambos os modelos, compensando assim os excessos de produção de vapor entre as 10 e as 11 horas e entre as 19 e 20 horas.



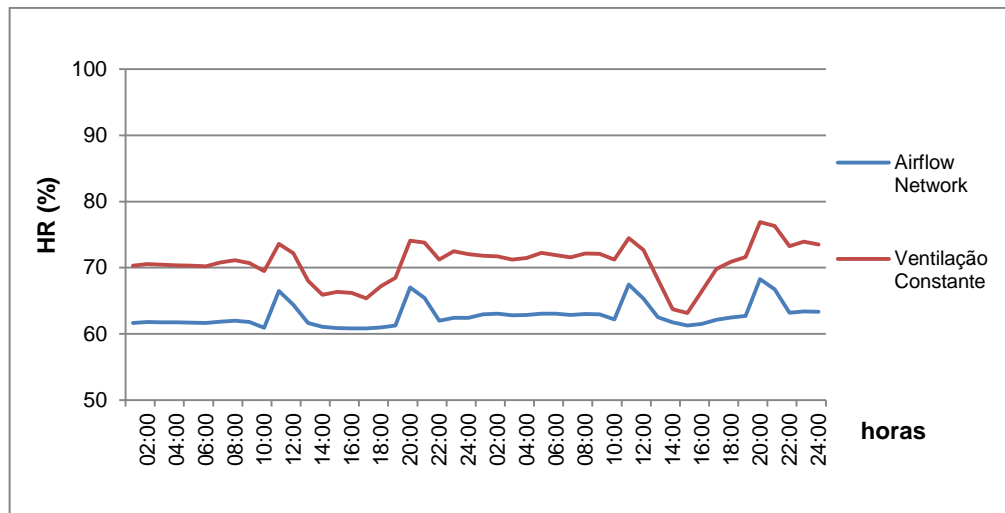
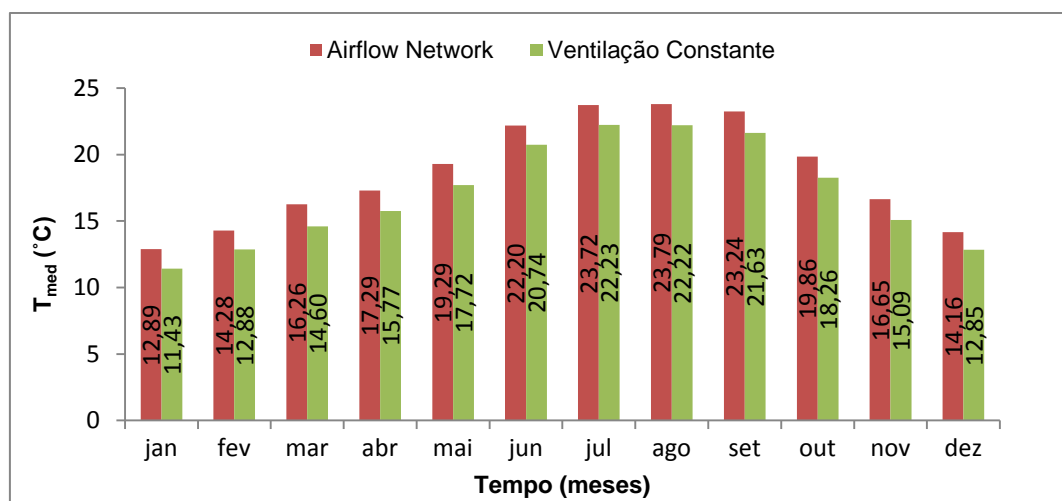


Figura 63 – Análise da HR na cozinha.

#### 4.3.3.3. Temperatura Interior

A temperatura interna é um parâmetro que é interessante de comparar para os dois modelos, para analisar como uma melhor ou pior ventilação da habitação afeta a temperatura interior de cada zona. A primeira zona a analisar será inicialmente a zona 1, que consiste na casa de banho. Esta é a zona que possui no geral, piores condições de ventilação. Como se pode constatar no gráfico que se segue:

- A temperatura interior mensal proveniente do modelo que integra o AirflowNetwork é sempre superior à temperatura do modelo com Rph constante de  $1h^{-1}$ . O valor médio anual no modelo Airflow é de  $18,6^{\circ}C$  e no modelo com Rph constante é de  $17,1^{\circ}C$ ;
- A maior discrepância acontece no mês de Março em que existe uma diferença de cerca de  $1,66^{\circ}C$ , sendo a média das diferenças da temperatura entre os dois modelos de  $1,5^{\circ}C$ .

Figura 64 – Análise mensal da  $T_{med}$  na casa de banho.

Tal como na comparação entre o modelo HAMT e EMPD, nesta comparação também se estuda o índice estatístico percentil 90, na figura 65, possibilitando assim retirar conclusões mais acertadas. Tal como para o índice de temperatura média mensal, pode-se constatar pelo percentil 90 do mesmo parâmetro que se mantém em todos os meses o facto da temperatura no modelo AirflowNetwork ser superior ao modelo com ventilação constante.

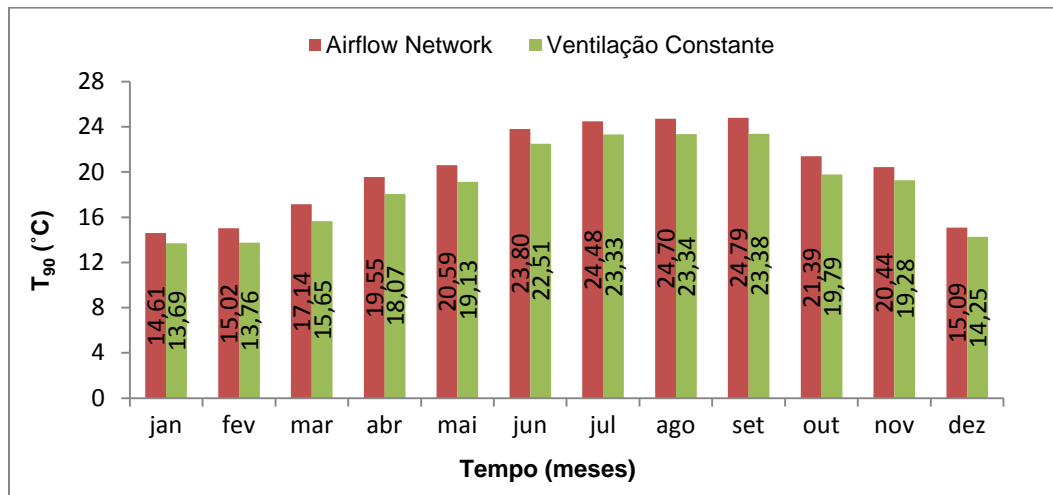


Figura 65 – Análise mensal da  $T_{90}$  na casa de banho.

Comparando agora os resultados da sala, zona com melhor ventilação, verifica-se que se mantém superior a temperatura proveniente do modelo AirflowNetwork, sendo que a diferença entre os modelos é menor. Teoricamente seria de esperar que a temperatura da zona da sala no modelo Airflow fosse inferior pois esta possui uma melhor ventilação (com valores semelhantes ao modelo de ventilação constante). Porém, o facto de existir interação entre as diversas zonas do apartamento, e ocorrerem portanto trocas térmicas entre os vários compartimentos, leva a que a temperatura na sala, no modelo com ventilação variável, suba pelo facto de a temperatura nos quartos e casa de banho ser relativamente superior neste modelo. Assim, devido ao aumento da temperatura exibido pelo modelo AirflowNetwork para os quartos e casa de banho, compreende-se que os valores apresentados para a sala sejam superiores aos previstos.

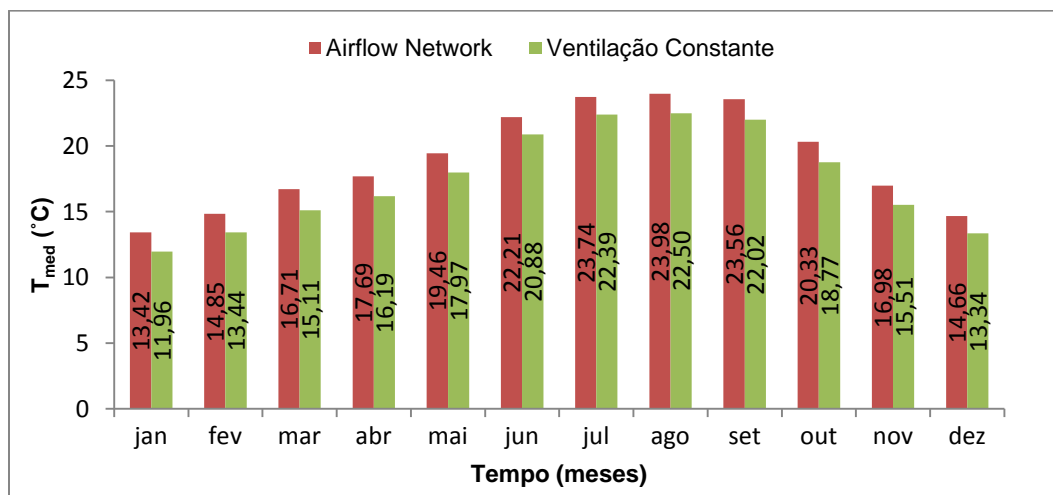
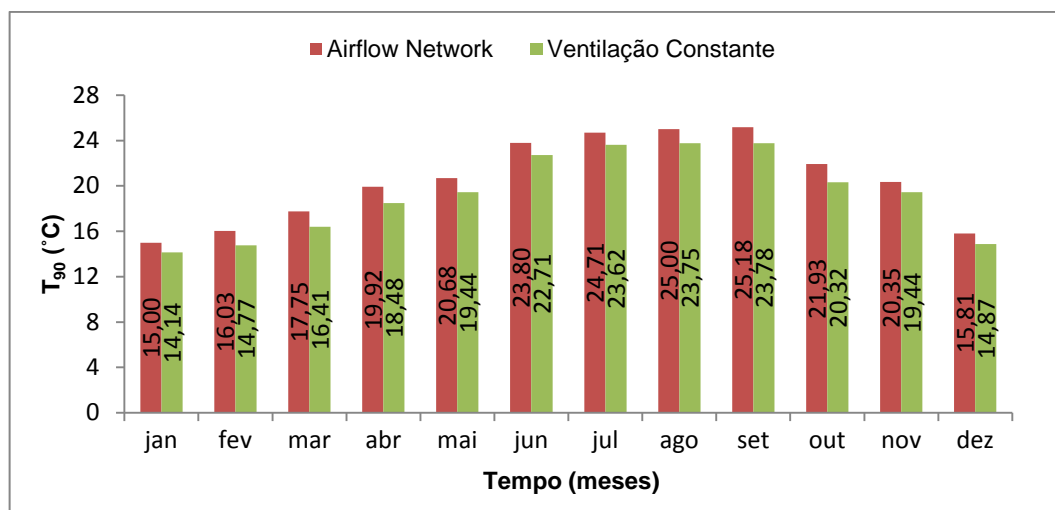


Figura 66 – Análise mensal da  $T_{med}$  na sala.

Figura 67 – Análise mensal da  $T_{90}$  na sala.

A diferença média dos valores do percentil 90 para o parâmetro da temperatura interna é de 1,24°C, sendo que a maior diferença ocorre no mês de Abril.

Na figura 68 apresentam-se as temperaturas para o intervalo de tempo entre os dias 15 de Janeiro e 20 de Janeiro na zona 1. Verifica-se que o modelo com ventilação constante possui sempre valores de temperatura interior inferiores resultante de possuir uma ventilação, em geral, muito superior à do modelo AirflowNetwork. Como o período em estudo consiste no mês de Janeiro, que é um dos meses mais frios do ano na cidade do Porto, uma diferença no número de renovações horárias de ar entre os dois modelos afeta significativamente a temperatura interior. Sendo a redução da temperatura mais acentuada para o modelo com melhor ventilação.

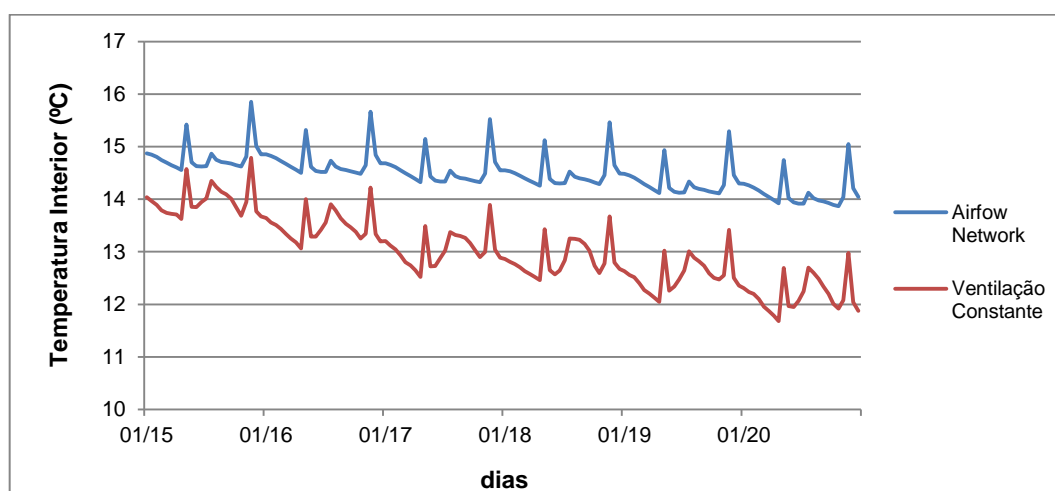


Figura 68 – Temperaturas registadas entre os dias 15 e 20 de Janeiro para a casa de banho.

#### 4.3.3.4. Humidade Relativa

Outro importante parâmetro a estudar é a humidade relativa. A variação do grau de ventilação gera diferenças nos valores de humidade relativa. De seguida apresentam-se os valores médios mensais de humidade relativa para a casa de banho e para a sala nas figuras 69 e 70, respetivamente:

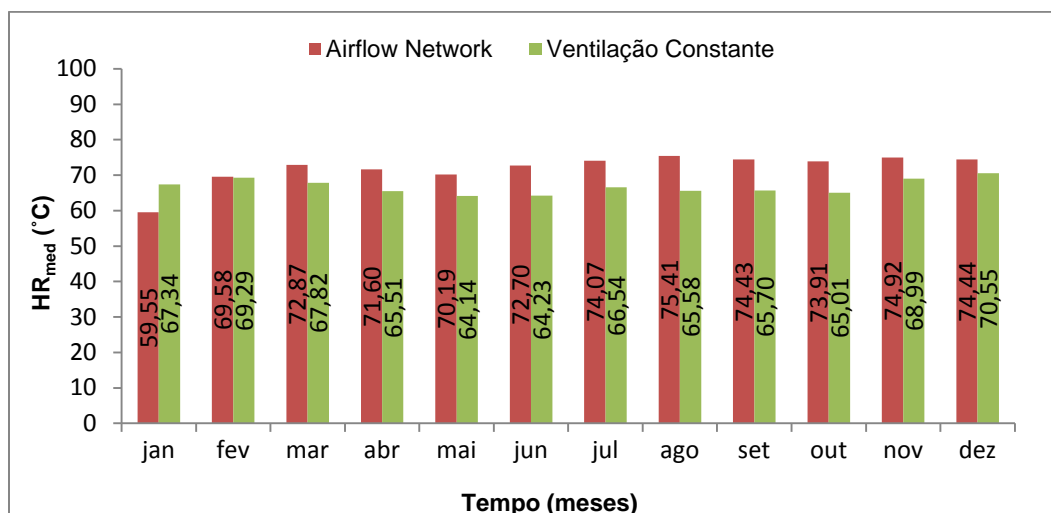


Figura 69 – Análise mensal da HR para a casa de banho.

Analisando os valores da figura 69 verifica-se que os valores médios mensais do modelo AirflowNetwork são elevados, chegando em Agosto a superar os 75%. Sendo o valor médio tao elevado, é previsível que durante os períodos diários críticos de utilização do compartimento se apresentem valores de HR bem superiores aos 75 %. O AirflowNetwork apresenta, na grande maioria do ano, valores superiores de humidade relativamente ao modelo com ventilação constante, tal como seria de esperar.

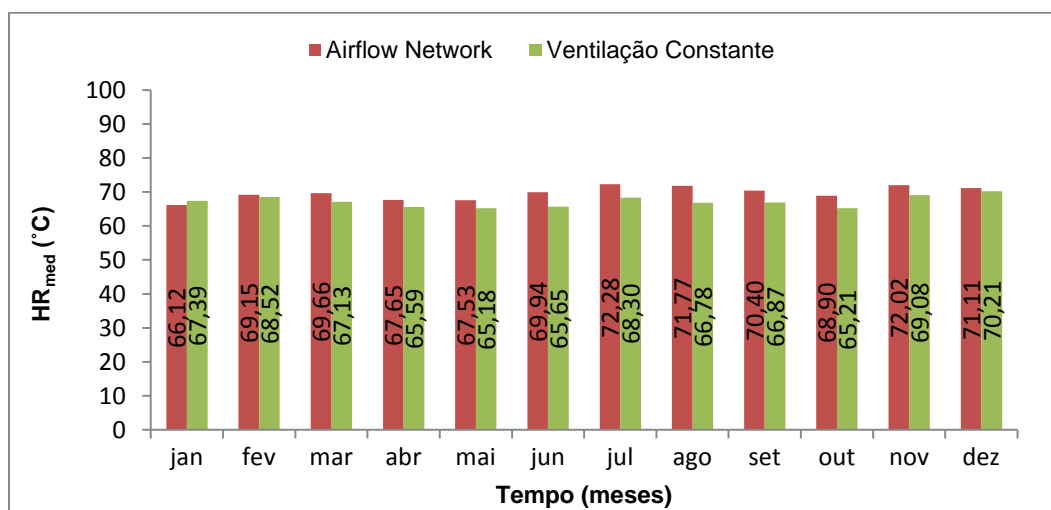


Figura 70 – Análise mensal da HR para a sala.

Tal como se pode verificar os valores de humidade relativa são muito mais próximos entre modelos para a sala do que para a casa de banho; a justificação para este facto é a diferença de ventilação a que cada zona está sujeita, constata-se que a sala apresenta uma ventilação muito semelhante em ambos os modelos, enquanto a casa de banho evidencia maior discrepância nos valores de Rph de cada modelo.

A média das diferenças dos valores de humidade relativa entre os dois modelos é:

- Para a casa de banho de 6,55%
- Para a sala de 2,76%

Sendo a humidade um parâmetro fortemente relacionado com o grau de ventilação, este parâmetro sofre facilmente alterações com base em mudanças no grau de ventilação. O facto de no modelo AirflowNetwork a casa de banho possuir uma ventilação quase nula ao longo de grande parte do dia, e somente nos períodos de ocupação é que possui uma ventilação mais apropriada, resulta em valores bastante elevados para a humidade relativa, como se pode verificar na figura 69. Assim se explica a discrepância entre os valores de HR apresentados na casa de banho. O ideal seria aumentar o grau de ventilação do local para que não se atinjam valores mensais de 75%, através de um funcionamento mínimo constante da ventoinha na casa de banho.



# 5

## RESULTADOS DO CASO DE ESTUDO

### 5.1. DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS HIGROTÉRMICOS DESENVOLVIDOS

Aproveitando as potencialidades do programa EnergyPlus, geraram-se vários cenários para simular diferentes situações no apartamento em estudo. O desenvolvimento dos cenários teve como base informação proveniente de um inquérito realizado no bairro onde se situa o apartamento. Através da informação adquirida pretende-se simular situações mais realistas, que estejam de acordo com os padrões de utilização detetados.

Com a criação destes cenários pretende-se abranger uma vasta gama de possibilidades, permitindo realizar a comparação entre distintas situações e retirar conclusões sobre qual o sistema de ventilação mais eficaz e adequado. A ventilação possui um importante papel no comportamento higrotérmico de um edifício, sendo de extrema importância no Inverno como meio de redução das condensações superficiais. Porém, também tem de ser controlada, de modo a não reduzir demasiado a temperatura interior da habitação.

Os elementos que variam entre os vários cenários são:

- Ventilação mecânica – a influência da ventilação mecânica é um parâmetro que é interessante de estudar pois condiciona significativamente o grau de ventilação existente na habitação. Assim, existem cenários onde é somente desligada a ventoinha da zona 1 (casa de banho), outros onde é somente desligada o exaustor da zona 3 (cozinha) e outros onde se desligam ambos os equipamentos mecânicos do apartamento;
- Horário de ocupação – até ao presente capítulo simulou-se apenas um horário diário para todos os dias da semana, não tendo em conta que os horários dos habitantes tendem a variar durante o fim-de-semana. Pretende-se portanto, tornar a simulação mais realista e para isso implementam-se dois horários diários distintos, um para os dias da semana e outro para o fim-de-semana. Esta alteração permite averiguar a fiabilidade das simulações realizadas até este capítulo, através da comparação entre uma simulação com um só horário de ocupação e uma simulação onde se consideram os dois horários de ocupação. São apresentados na tabela 7, os horários referidos.

Tabela 7 – Horários de ocupação de cada zona.

Zonas	Horário de ocupação à semana	Horário de ocupação ao fim-de-semana
Zona 1	09:00 -10:00	10:00 -11:00
	21:00 – 22:00	19:00 – 20:00
Zona 2	21:00 – 24:00	21:00 – 24:00
Zona 3	10:00 – 11:00	11:00 – 12:00
	19:00 – 20:00	19:00 – 20:00
Zona 4 a zona 6	00:00 – 08:00	00:00 – 08:00

- Abertura de janelas – pretende-se estudar a influência da abertura das janelas num período compreendido entre as 8 e as 10 da manhã. É de salientar que só se abrem as janelas nos quartos, permanecendo fechadas as restantes janelas da habitação;
- Aquecimento da habitação – o objetivo é analisar as consequências da implementação de um aquecedor de potência de 1200 W na sala. O aquecedor está ligado durante o intervalo das 21 às 23 horas, para os meses mais frios do ano que são Dezembro, Janeiro e Fevereiro.

Surge assim na tabela 8 uma lista com os cenários simulados:

Tabela 8 – Cenários higrotérmicos desenvolvidos.

Cenários	Ventilação Mecânica	Horário de Fim-de-semana	Abertura de janelas	Aquecimento
1	Na zona 1 e zona 3	Considerado	Não	Não
2	Na zona 1 e zona 3	Não considerado	Não	Não
3	Inexistente	Considerado	Não	Não
4	Na zona 3	Considerado	Não	Não
5	Na zona 1	Considerado	Não	Não
6	Na zona 1 e zona 3	Considerado	Sim	Não
7	Inexistente	Considerado	Sim	Não
8	Na zona 1 e zona 3	Considerado	Não	Sim
9	Inexistente	Considerado	Não	Sim



## 5.2. ANÁLISE DE PARÂMETROS

Com base nos cenários simulados foram calculados para os meses Dezembro, Janeiro e Fevereiro diversos parâmetros:

- Renovações de ar;
- Concentração de dióxido de carbono;
- Temperatura interior;
- Humidade relativa.

Realizou-se o cálculo dos parâmetros para os meses referidos devido a serem os meses mais frios do ano, na cidade do Porto. Durante este período como consequência das temperaturas reduzidas que se fazem sentir no exterior, existe um menor cuidado em ventilar a habitação por parte dos utilizadores.

### 5.2.1 COMPARAÇÃO GERAL DA VENTILAÇÃO

Na figura 71 surge o gráfico da frequência acumulada para as renovações de ar por hora para os diversos cenários, e na figura 72 são exibidos os valores médios das renovações horárias de ar, no apartamento para cada um dos cenários.

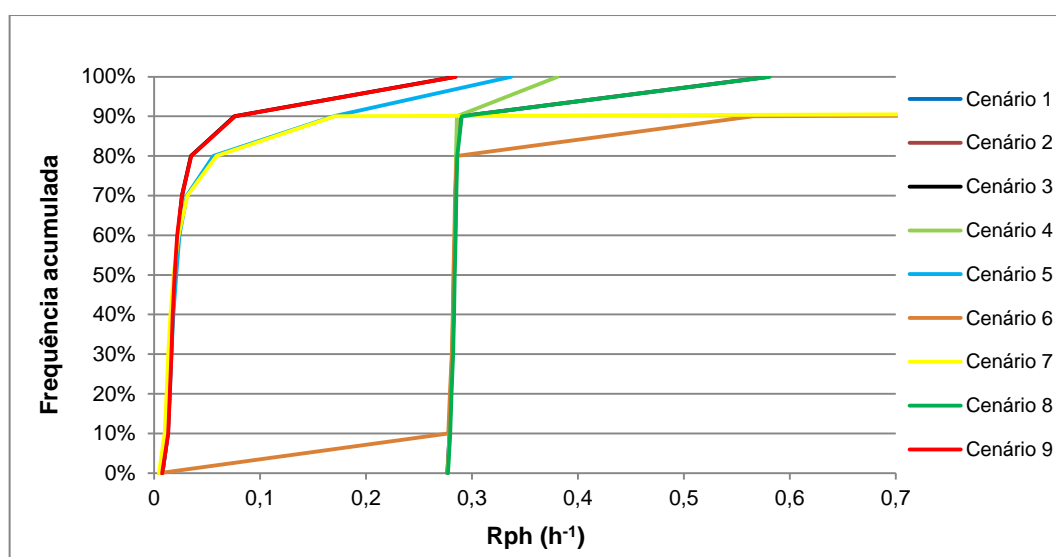


Figura 71 – Frequência acumulada dos valores de Rph.

Através do gráfico anterior pode-se constatar que existe uma elevada discrepância entre os valores máximos apresentados nos cenários, especialmente nos cenários onde é considerada a abertura das janelas. São exibidos no gráfico todos os cenários simulados, porém como os números de Rph existentes para os modelos com abertura das janelas são muito elevados (ultrapassando as 11 renovações horárias de ar por hora) optou-se por não alongar a escala dos Rph até valores dessa ordem de grandeza. Assim sendo, no gráfico das frequências acumuladas apenas se exibe os valores até uma renovação horária de  $0,7 \text{ h}^{-1}$ . A justificação para esta alteração no gráfico consiste na dificuldade que resultava em visualizar e interpretar os restantes cenários, caso se apresentassem todos os valores de Rph.

O gráfico de frequências acumuladas permite uma fácil percepção da variação de renovações horárias de ar para cada um dos cenários. Examinando o comprimento de uma curva no eixo dos Rph, facilmente se percebe se o cenário em estudo possui uma elevada amplitude de valores de Rph ou se consiste num cenário com reduzida diferença entre os valores de Rph apresentados.

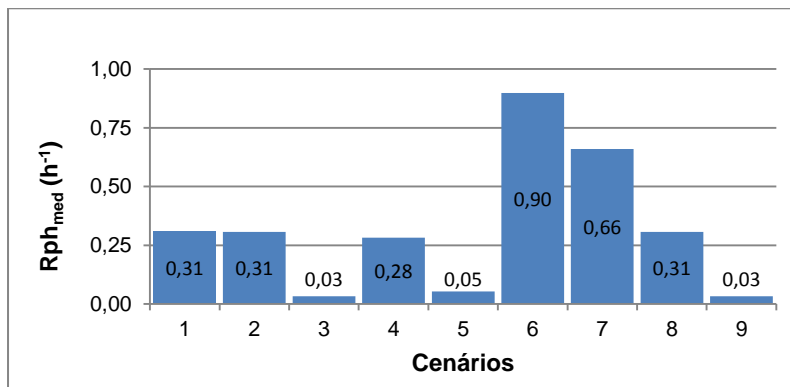


Figura 72 – Análise aos valores médios de renovações horárias do ar na habitação.

Como se pode verificar nos gráficos das figuras 71 e 72 existe uma grande semelhança entre o cenário 1, o cenário 2 e o cenário 8, sendo que o cenário 4 também não difere muito destes casos. Os cenários que apresentam valores mais distintos são os cenários onde se retira a ventilação mecânica na zona 3 e os cenários onde existe abertura das janelas. A abertura das janelas durante o período entre as 8 e as 10 horas possibilita a admissão de caudais de ar na habitação muito superiores aos caudais das restantes situações simuladas, tornando deste modo, estas situações nos cenários com maiores valores de Rph<sub>med</sub>.

Os cenários que apresentam piores valores de ventilação são os cenários que não possuem ventilação mecânica, exceto o cenário 7 onde se abrem as janelas durante duas horas diárias, compensando deste modo os baixos valores apresentados nos restantes períodos do dia.

Verifica-se ainda que não existe grande diferença em termos de renovações horárias de ar entre os dois primeiros cenários simulados. Assim sendo, a simplificação realizada anteriormente onde somente se considerava um horário para toda a semana, não aparenta ter grande influência nos valores de Rph, embora deva-se estudar mais pormenorizadamente esta simplificação para permitir retirar conclusões mais fundamentadas.

#### 5.2.2. COMPARAÇÃO GERAL DOS NÍVEIS DE CO<sub>2</sub>

A análise dos níveis de dióxido de carbono é um parâmetro importante de estudar, pois tal como já foi referido, permite uma melhor percepção da qualidade da ventilação existente num edifício. Surge assim na figura 73, um gráfico de frequência acumulada com a concentração de CO<sub>2</sub> no quarto 2 (zona 5) para os diversos cenários:

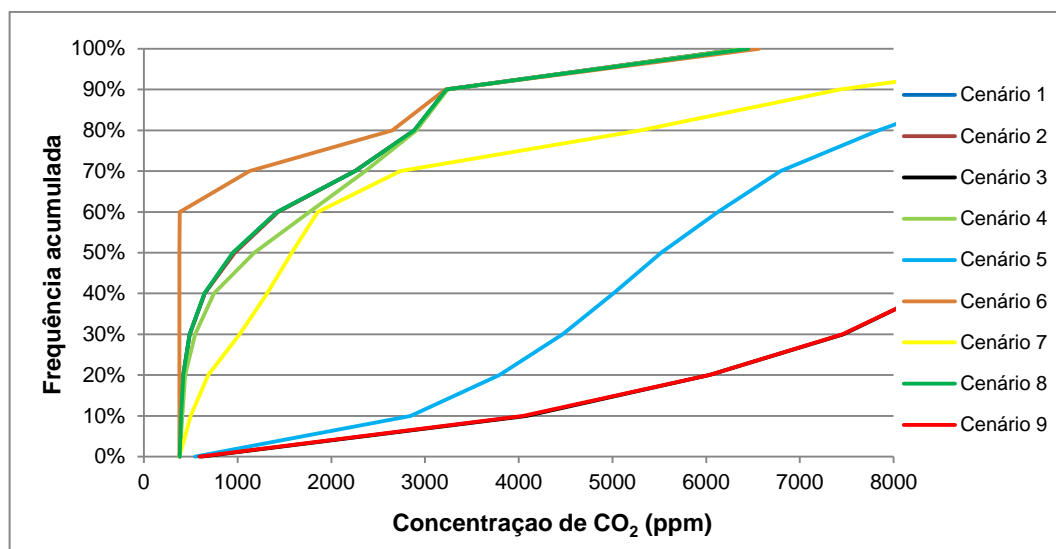


Figura 73 – Frequência acumulada da concentração de CO<sub>2</sub> na zona 5.

Os valores da concentração média e do percentil 90 para cada cenário são apresentados na figura 74, com o intuito de facilitar a interpretação dos resultados:

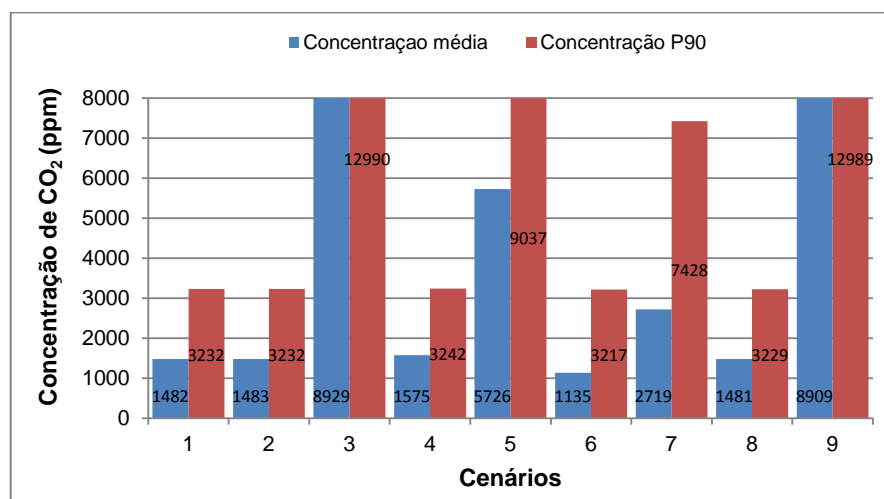


Figura 74 – Análise aos valores médios e P90 da concentração de CO<sub>2</sub> na zona 5.

Examinando os valores dos gráficos anteriores, verifica-se que os cenários que possuem extração constante ao longo do dia, na zona 3, são os cenários que apresentam menores valores para o parâmetro em estudo. Assim confirma-se que os cenários que possuem melhor ventilação são os cenários 1, 2, 6 e 8.

O cenário 7, apesar de apresentar um valor médio de renovação de ar por hora, apresenta valores de CO<sub>2</sub> excessivos, principalmente para o indicador estatístico percentil 90. Este facto deve-se aos reduzidos valores de Rph apresentados ao longo do dia, exceto para o período em que se abrem as janelas. No subcapítulo seguinte estuda-se de forma mais pormenorizada a influência da abertura das janelas num período matinal na concentração de CO<sub>2</sub>.

É de salientar ainda os valores excessivamente altos para os cenários 3, 5 e 9 pois são cenários que apresentam deficientes condições de ventilação, tal como se pode confirmar nos resultados do parâmetro anterior.

### 5.2.3. COMPARAÇÃO GERAL DA TEMPERATURA INTERIOR

Estudou-se neste ponto a temperatura interior na sala, por se tratar de uma zona onde os moradores permanecem durante um período de tempo relevante. Os valores das temperaturas interiores apresentados na figura 75 são:

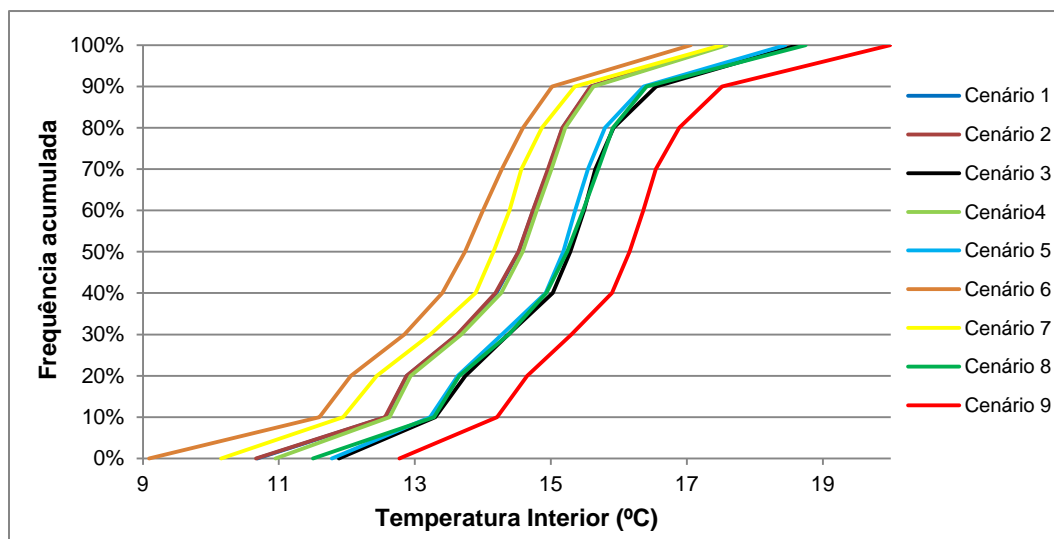


Figura 75 – Frequência acumulada dos valores da temperatura na zona 2.

Na figura 76 aparecem os valores médios das temperaturas interiores para cada cenário:

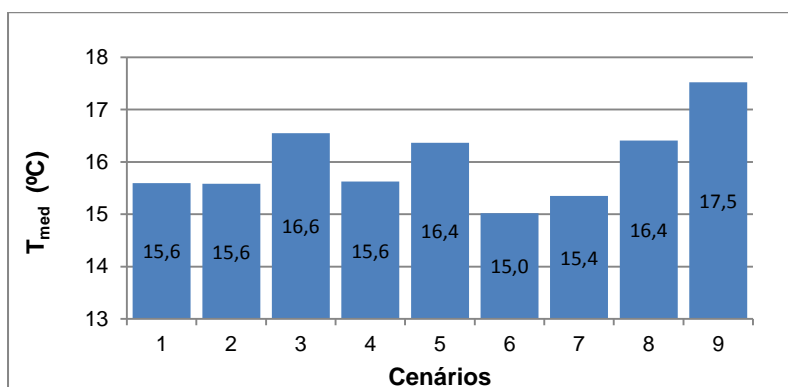


Figura 76 – Análise aos valores médios da temperatura na zona 2.

Verifica-se que dos cenários onde não se recorre a um aquecedor para aquecer a zona 2, os que apresentam temperaturas interiores superiores são os cenários sem extração mecânica de ar, ou seja, os cenários com menores valores de renovação de ar. Os cenários onde se aquece a zona 2 (cenários 8 e 9) são os que apresentam valores superiores para as temperaturas internas.

Comparando a figura 75 e a figura 71, onde surgem os valores de Rph para a habitação, constata-se que à medida que se aumenta as taxas de renovação de ar no interior do apartamento, maior é a influência da temperatura exterior no valor da temperatura interior. Um exemplo deste acontecimento é o cenário 6, onde existe ventilação mecânica e ainda se abrem as janelas durante duas horas todas as manhãs, que possui elevados valores de Rph e uma temperatura interior reduzida. Examinando o gráfico da figura 75 anterior verifica-se que o cenário 6 se trata do cenário com maior amplitude térmica, onde 60% dos valores da temperatura na sala se situam abaixo dos 14 °C.

#### 5.2.4. COMPARAÇÃO GERAL DA HUMIDADE RELATIVA

O compartimento onde se optou por estudar este parâmetro é a sala, pois trata-se de um compartimento com elevado número de habitantes durante o período de ocupação.

Nas figuras 77 e 78 representam-se os valores da humidade relativa para as situações simuladas:

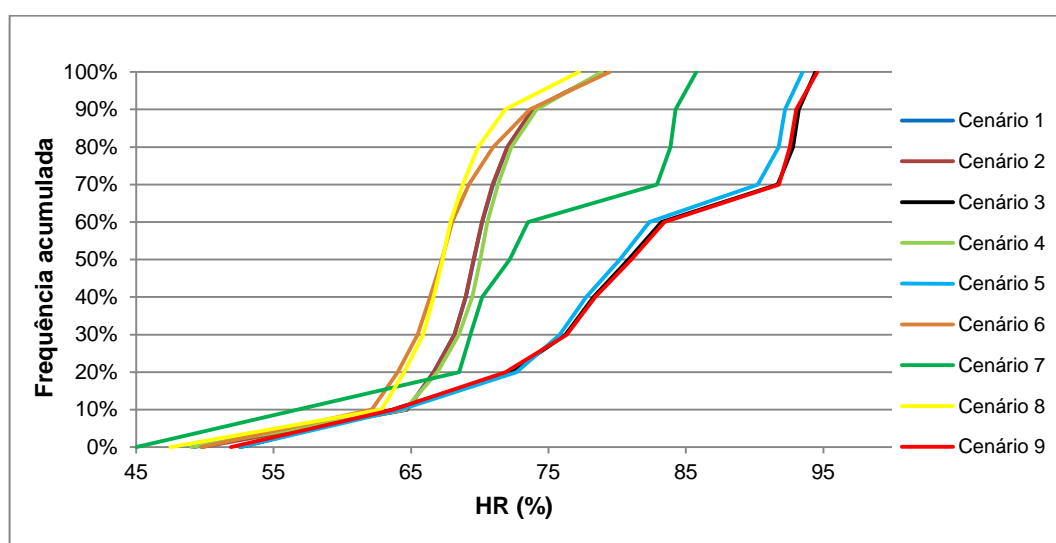


Figura 77 – Frequência acumulada dos valores da humidade relativa na zona 2.

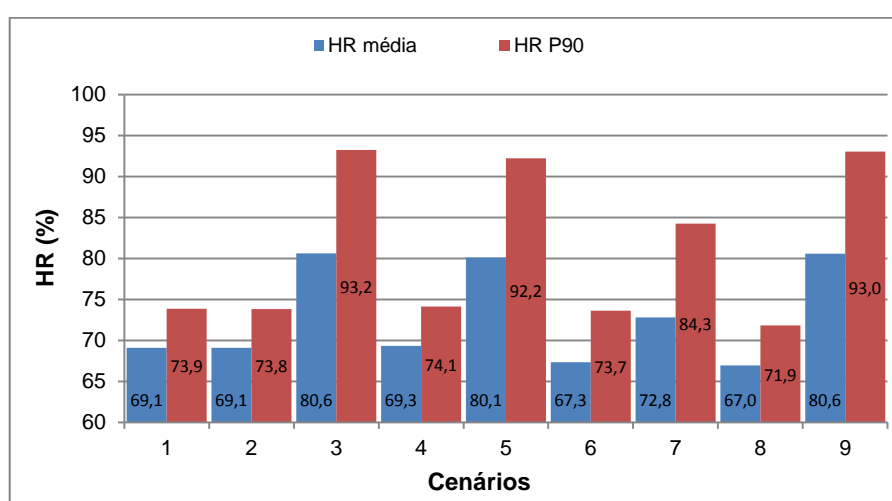


Figura 78 – Análise aos valores médios e P90 de HR na zona 5.

Os cenários sem exaustão apresentam valores de humidade relativa média a rondar os 80%, exceto o cenário 7, onde a abertura das janelas nos quartos reduz a humidade presente no ar.

Os cenários 3,5 e 9 são cenários que apresentam valores preocupantes de humidade relativa, chegando-se a atingir nos três cenários 95%. Mais uma vez verifica-se que o sistema de ventilação implementado nestes cenários é bastante deficiente, uma vez que o valor limite de humidade relativa aconselhado é de 80%.

O valor de humidade relativa mais baixo é de 45% e ocorre no cenário 6, que tal como já se tinha verificado para os parâmetros anteriormente estudados é o cenário que possui melhor ventilação.

### 5.3. COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS HIGROTÉRMICOS

Neste subcapítulo pretende-se comparar de forma mais pormenorizada alguns cenários, para aprofundar o estudo da influência das alterações realizadas, no ambiente que se faz sentir na habitação. Recorre-se mais uma vez a indicadores estatísticos para facilitar a comparação entre os vários cenários.

#### 5.3.1 COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS 1 E 2

A primeira comparação é realizada entre os dois primeiros cenários. A única diferença entre estes cenários é que para o segundo se considera um só tipo de horário para toda a semana, ao contrário do primeiro cenário onde se considera um horário para os dias da semana e outro para o fim-de-semana.

Surge assim a comparação dos valores da temperatura interior e dos níveis de CO<sub>2</sub> para a sala (zona 2), na tabela 9.

Tabela 9 – Valores médios e P90 para os parâmetros temperatura interior e concentração de CO<sub>2</sub>, na zona 5.

Cenários	Temperatura Interior		Concentração de CO <sub>2</sub>	
	Valor médio	Percentil 90	Valor médio	Percentil 90
<b>1</b>	14,25	15,59	1049	1668
<b>2</b>	14,24	15,58	1044	1661

Como se pode verificar pelos resultados calculados, ambos os cenários apresentam valores muito semelhantes para os dois parâmetros calculados na zona 2. Confirma-se assim que a simplificação de considerar apenas um horário semanal ao longo de toda a semana, e não considerar portanto que os habitantes alteram os seus hábitos ao fim-de-semana, é bastante aceitável. Não se prevendo erros significativos resultantes desta simplificação, consideram-se válidos os resultados calculados, no capítulo anterior, com base num só horário.

### 5.3.2 COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS 1, 3, 4, 5

Neste ponto compara-se o Cenário 1, que pode ser considerado a base dos restantes cenários, com os cenários 3, 4 e 5. Estes 3 cenários de comparação são situações para as quais se reduz a ventilação mecânica da habitação de diferentes formas.

Na figura 79 são apresentados os valores médios de renovação de ar por hora para cada zona, nos 4 cenários em estudo. Deste modo compreende-se não só o funcionamento global da habitação como também o funcionamento específico de cada zona.

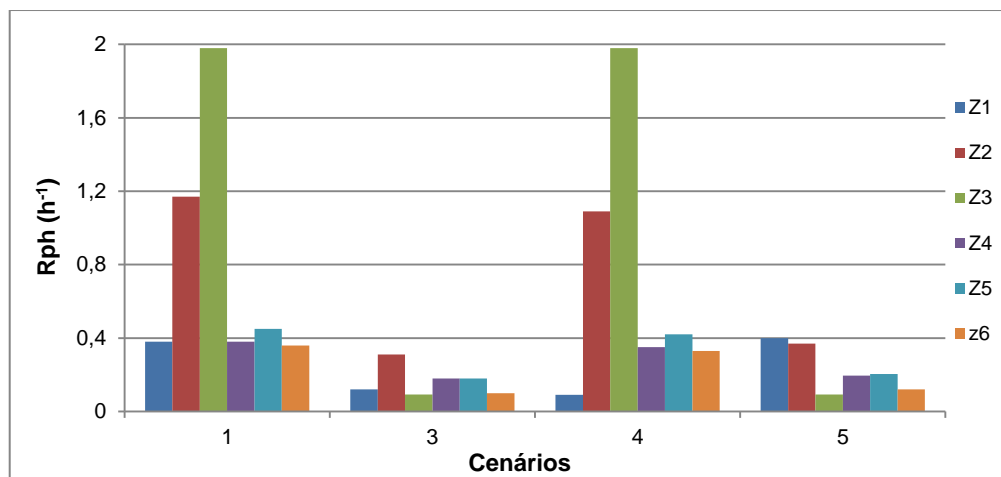


Figura 79 – Análise às  $Rph_{med}$  de cada compartimento.

Ao analisar a figura 79 verifica-se que:

- Para os cenários 1 e 4 existe uma elevada taxa de ventilação na zona 3, resultante de uma extração contínua, por parte do exaustor, de  $60 \text{ m}^3/\text{h}$ ;
- A sala é o compartimento mais afetado pelo funcionamento do exaustor. O corte da ventilação mecânica na cozinha reduz em cerca de 60% os níveis de Rph na sala.
- A ventilação nos compartimentos de serviço torna-se quase nula quando estes não possuem o sistema de extração de ar mecânico ativado;
- Um corte na ventilação mecânica da cozinha tem manifestamente maior relevância para a ventilação da habitação do que um corte da ventilação mecânica na casa de banho. A justificação consiste na duração do tempo funcionamento que cada equipamento tem quando está ativado;
- O Rph dos quartos é reduzido para cerca de metade nos cenários onde não existe exaustor na zona 3;
- A zona 5, que corresponde ao quarto 2, apresenta um valor de Rph ligeiramente superior ao dos restantes quartos da habitação como consequência de ser o quarto que possui menor volume.

Aprofundando um pouco mais a comparação entre os quatro cenários em estudo, calculou-se as renovações de ar por hora para a zona 2 e a concentração de  $\text{CO}_2$  para a zona 5, considerando para ambos os parâmetros um período de dois dias. Optou-se por estudar os dois parâmetros para diferentes zonas para conseguir compreender melhor o funcionamento da ventilação na habitação. Estudar ambos os parâmetros para a mesma zona seria pouco produtivo, visto que ambos os parâmetros induzem as conclusões similares.

As figuras 80 e 81 contêm os gráficos de cada parâmetro calculado, durante um período de dois dias.

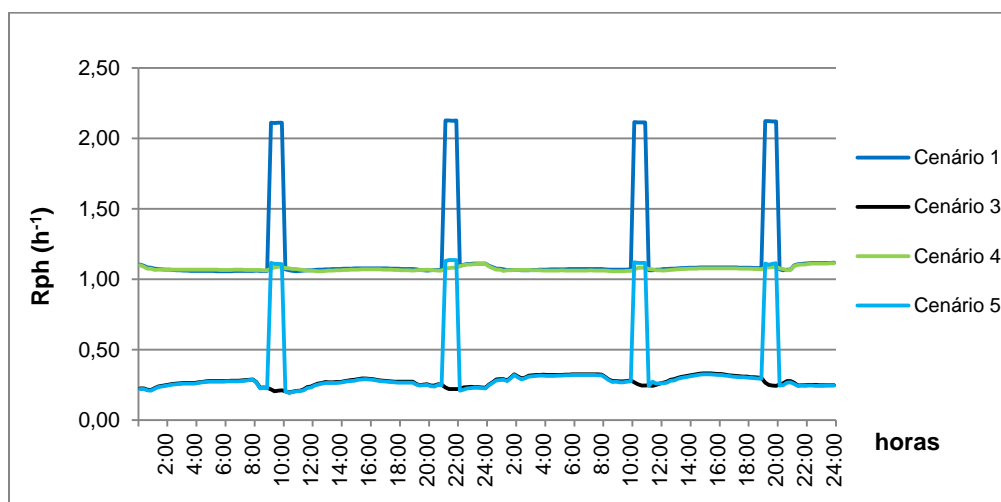


Figura 80 – Análise às renovações horárias de ar na zona 2.

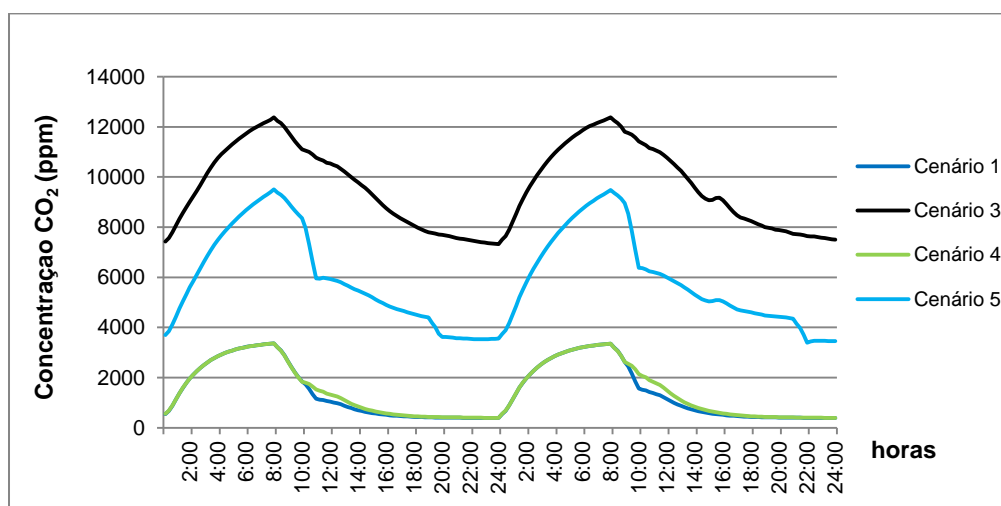


Figura 81 – Análise à concentração de CO<sub>2</sub> na zona 5.

As situações onde se verificam um menor número de renovações de ar por hora, para a zona 2, coincidem com as situações que apresentam valores de CO<sub>2</sub> mais elevados para a zona 5. O primeiro cenário é aquele onde existe melhor ventilação do apartamento, e como consequência, é o cenário que apresenta menores níveis de dióxido de carbono. Contrariamente, o cenário 3 é o cenário que apresenta menores valores de Rph e portanto o cenário que apresenta valores mais elevados de CO<sub>2</sub>.

Interessante ainda verificar como o funcionamento da ventoinha da casa de banho faz aumentar o Rph dos compartimentos da habitação, que consequentemente, implica uma redução da concentração de CO<sub>2</sub> em cada zona. Este acontecimento é perceptível comparando na figura 81 os cenários 1 e 4, observando o período entre as 9 horas e as 15 horas.

É ainda de salientar os valores excessivos de dióxido de carbono constatados nos cenários 3 e 5, resultante da uma ventilação da habitação quase nula durante quase todo o dia.



### 5.3.3 COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS 1, 3, 6 E 7

Nestas situações é interessante analisar a influência da abertura das janelas na redução do nível de CO<sub>2</sub> num quarto, porém, também se analisa a influência da abertura das janelas na temperatura interior da habitação. O período em estudo ocorre durante os meses mais frios do ano, pelo que um aumento de ventilação através da abertura das janelas tem como consequência a descida da temperatura interior da habitação. Os gráficos das figuras 82 e 83 traduzem, para a zona 5, a concentração de dióxido de carbono e da temperatura interior, respetivamente:

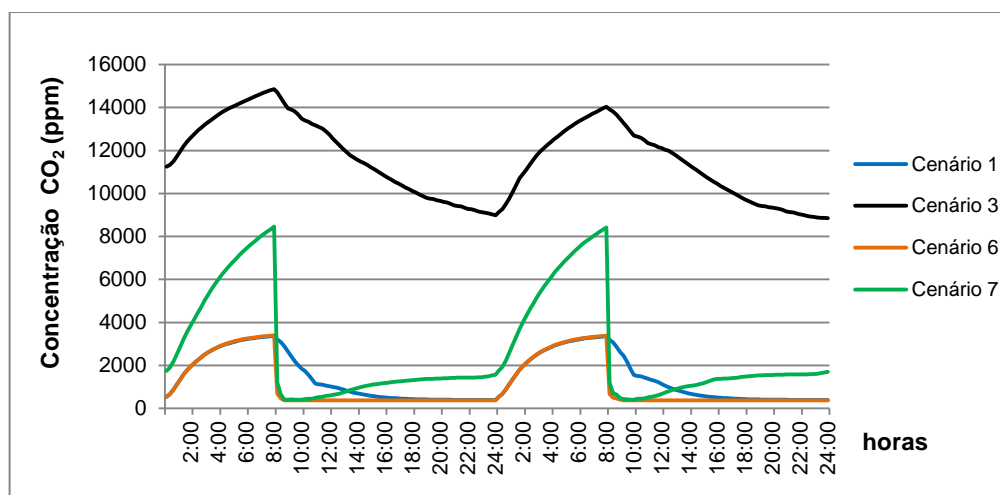


Figura 82 – Análise à concentração de CO<sub>2</sub> na zona 5.

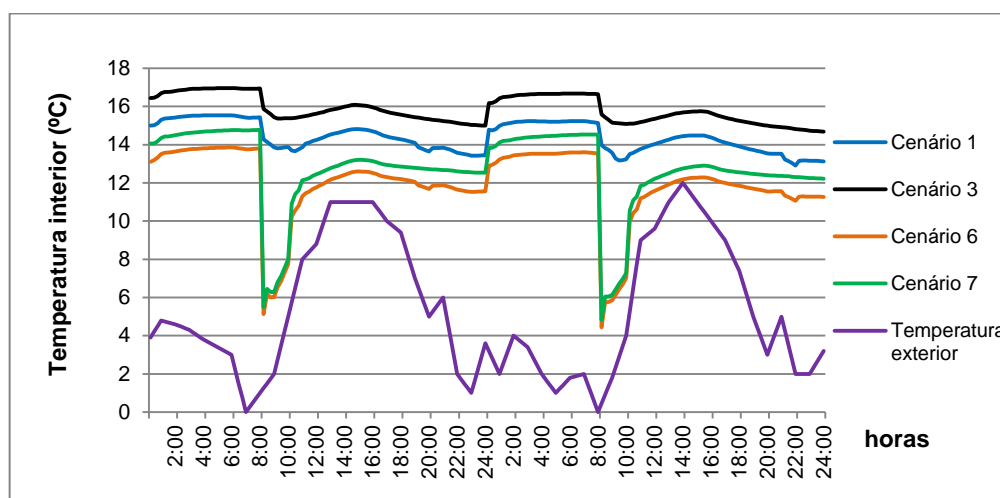


Figura 83 – Análise à temperatura interior na zona 5.

Através da abertura das janelas existe uma brusca redução dos níveis de CO<sub>2</sub> da habitação. É interessante comparar o cenário 3 com o cenário 7 onde através da abertura das janelas, num curto período matinal, se consegue reduzir a concentração de CO<sub>2</sub> de valores excessivamente elevados para valores mais adequados. Esta comparação exemplifica a importância e eficácia da abertura das janelas como forma de melhorar a ventilação numa habitação, bastando um curto período de tempo diário para que se obtenham valores significativamente melhores para a qualidade do ar.

Em contrapartida ao aumento da qualidade do ar, existe uma diminuição significativa da temperatura interior. Para o Cenário 6 ocorre uma redução da temperatura de cerca de 9 graus, tornando a temperatura interior do quarto relativamente baixa. Assim sendo, a abertura das janelas apesar de útil

para reduzir a concentração de  $\text{CO}_2$ , é responsável por uma brusca redução da temperatura da habitação.

Será interessante analisar o comportamento da pressão parcial do vapor de água, que consiste na pressão que o vapor de água teria caso ocupasse individualmente o volume ocupado pela mistura de ar a estudar [24]. Na figura 84 surgem os valores da pressão parcial de vapor de água na zona 5 para cada um dos cenários em comparação.

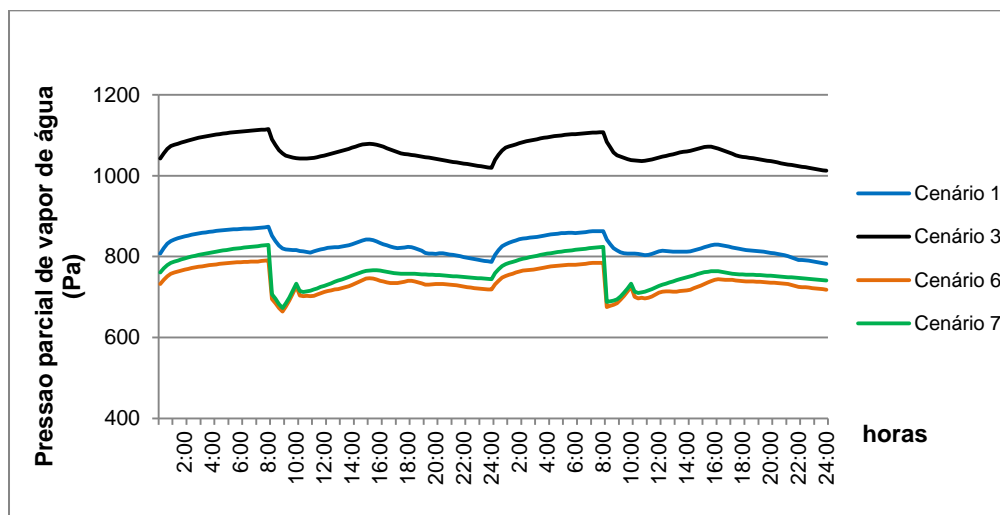


Figura 84 – Análise à pressão parcial de vapor de água para a zona 5.

Examinando o gráfico da figura 84, observa-se que a abertura das janelas no compartimento tem como consequência uma acentuada queda da pressão parcial de vapor de água. Porém o valor volta a subir ao longo do dia, principalmente durante o período noturno, onde se verifica uma maior taxa de crescimento para este parâmetro. A justificação para tal deriva do facto de que no intervalo de tempo onde existe maior taxa de crescimento do parâmetro em estudo há sobreposição com o período de ocupação da zona.

#### 5.3.4 COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS 1, 3, 8 E 9

Para terminar, na última comparação realizada pretende-se estudar as consequências do funcionamento de um aquecedor elétrico, durante um breve período diário, na sala de estar. O período de funcionamento do aquecedor é das 21 horas às 23 horas. Os parâmetros analisados neste ponto são a temperatura interior e a humidade relativa, ambos os calculados para a zona 2 (sala), e surgem nas figuras 85 e 86, respetivamente:

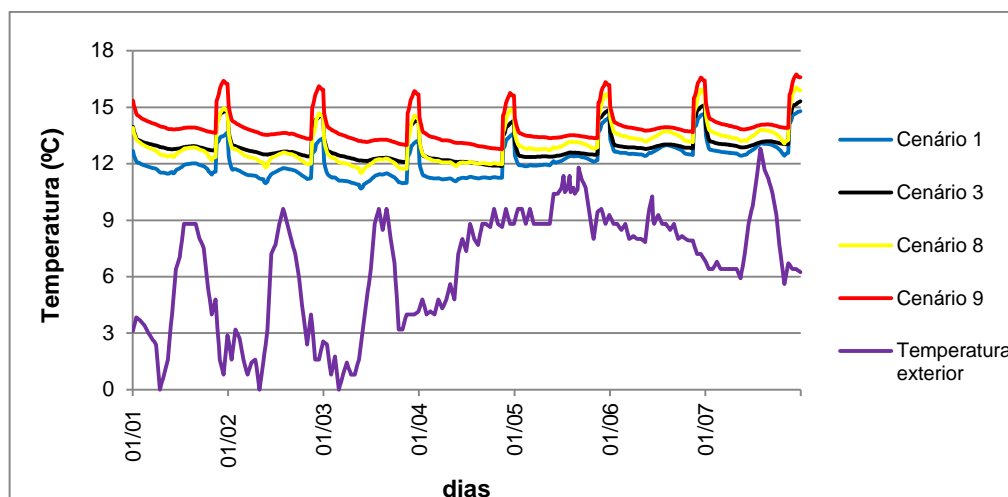


Figura 85 – Análise à temperatura na zona 2 durante a primeira semana de Janeiro.

Tabela 10 – Valores médios da temperatura na zona 2 durante a primeira semana de Janeiro.

Cenário 1	Cenário 3	Cenário 8	Cenário 9	Temp. Exterior
12,1	12,9	13,0	13,9	6,5

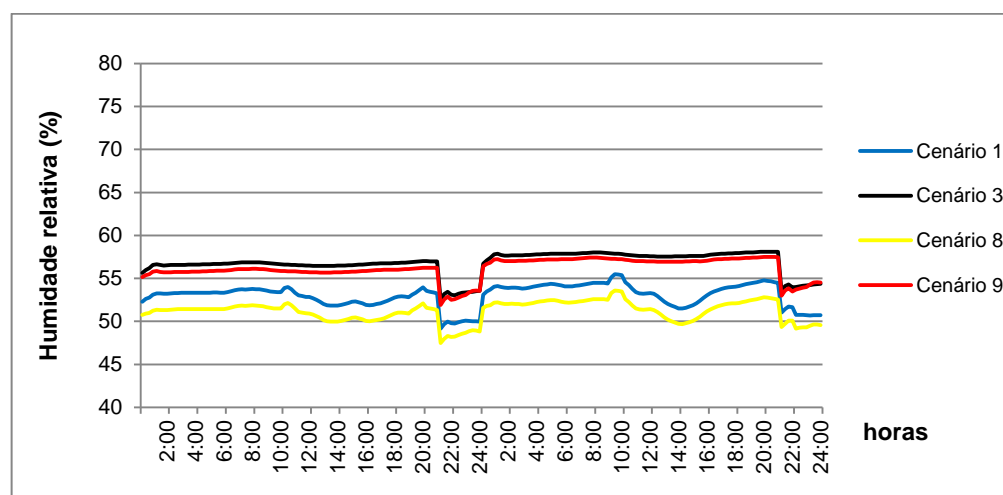


Figura 86 – Análise à humidade relativa na zona 2.

Analisando o gráfico da figura 85, que traduz a temperatura interior da zona em estudo, para a primeira semana do mês de Janeiro, verifica-se que existe um aumento da temperatura em todos os cenários a serem comparados neste ponto, durante o período de ocupação. A explicação para este acontecimento provém do calor libertado pelos ocupantes no compartimento, que o programa tem em consideração, e faz aumentar a temperatura ambiente do compartimento. Comparando agora os cenários onde se recorre a um aquecedor e os cenários onde não se recorre, verifica-se que através da introdução do aquecedor existe um aumento global diário da temperatura interior. Pode-se verificar através dos valores médios da temperatura interna de cada cenário, que a utilização do aquecedor aumenta em média cerca de 1 °C a temperatura interior. Apesar de o aquecedor só funcionar durante

um período de 2 horas, o grau de ventilação destes cenários não é suficientemente elevado para dissipar o calor gerado nesse período de duas horas, e portanto verifica-se um aumento constante diário da temperatura interna na sala em relação aos modelos onde não existe aquecimento da sala.

Analisando a figura 86 verifica-se que não existem grandes variações no valor de humidade relativa ao longo de um dia; somente no período de ocupação é que se verifica uma diminuição da humidade relativa, resultante do aumento da temperatura da zona. Nos cenários onde existe aquecimento da zona 2, a quebra da humidade relativa ocorre com maior intensidade durante o período das 21 às 23 horas, que coincide com o intervalo de tempo onde o aquecedor está em funcionamento. Após as 23 horas, a humidade relativa decresce até às 24 horas embora com menor intensidade.

De salientar ainda a reduzida variação dos valores de humidade relativa que se observa ao longo dos dois dias estudados, o que se deve à fraca ventilação existente em cada cenário. Especialmente para os cenários 3 e 9 onde, não contabilizando com o período de ocupação da zona, não se verifica alteração dos valores de humidade relativa com relevância.

É ainda estudado o consumo energético que resulta do uso do equipamento elétrico, sendo que este possui uma potência de 1200 W. Na figura 87, representa-se para uma duração de dois dias a temperatura interna na zona 2 no eixo superior, e o consumo elétrico do aquecedor utilizado no eixo inferior.

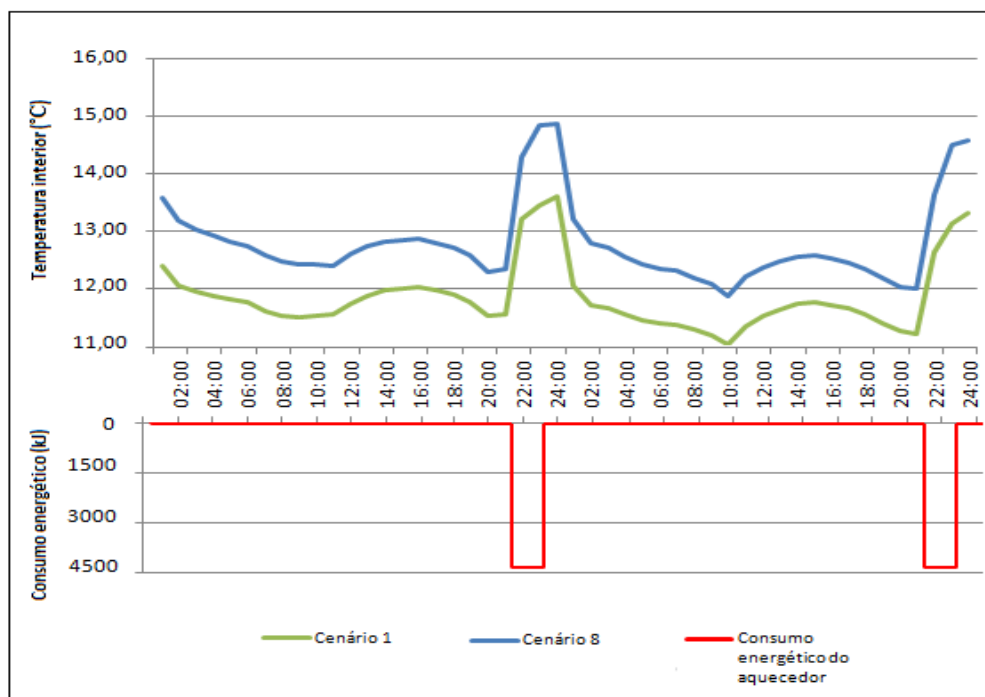


Figura 87 – Análise à temperatura interior e ao consumo energético do aquecedor na zona 2.

O aquecedor utilizado no modelo tem um consumo horário de 4320 kJ, assim sendo existe um gasto de energia mensal derivado do uso do aquecedor de aproximadamente 260 000 kJ que correspondem a 72 kWh.

## **5.4. SÍNTESE DE RESULTADOS**

Após uma cuidadosa análise dos resultados do presente capítulo, conclui-se que:

- A simplificação em considerar um horário igual para todos os dias da semana, e não considerar portanto que os hábitos dos moradores se alteram durante o fim-de-semana, é uma simplificação aparentemente válida devido às semelhanças apresentadas nos resultados dos dois primeiros cenários. Em ambos os parâmetros estudados os resultados entre os dois cenários são quase idênticos;
- À medida que se aumentam as taxas de renovação horária de um edifício, maior é a influência da temperatura exterior na habitação;
- A sala é o compartimento mais afetado pelo funcionamento do exaustor da zona 3. Um corte da ventilação mecânica na mesma zona origina uma redução de cerca de 60% do valor de Rph da sala;
- Nos modelos simulados, quando se retiram os equipamentos responsáveis pela ventilação mecânica da habitação, as zonas de serviço apresentam valores de Rph quase nulos. A justificação consiste na ausência de aberturas significativas para o exterior nesses compartimentos. Realizando-se somente trocas de ar com o exterior através das frinchas existentes, resultantes da permeabilidade das janelas; e no caso da casa de banho existe ainda a reduzida abertura onde se situa a ventoinha;
- Os cenários desenvolvidos abrangem uma vasta gama de valores de taxas de ventilação, assim sendo, existe uma grande amplitude de resultados para os parâmetros estudados, especialmente para a concentração de CO<sub>2</sub> e para a humidade relativa.
- Comparando a concentração de CO<sub>2</sub> entre os cenários 3 e 7 para um quarto da habitação, compreende-se a importância de realizar uma breve abertura das janelas nos compartimentos onde existe ocupação noturna. Este modo de agir permite uma melhor ventilação da habitação e consequentemente uma melhoria significativa da qualidade do ar. Contudo, através da abertura das janelas verifica-se que a temperatura interior tende a aproximar-se rapidamente da temperatura exterior, sendo portanto difícil de manter níveis de conforto adequados;
- Verificou-se que o cenário 6 é o cenário que possui ventilação média mais elevada em todos os compartimentos da habitação. Uma consequência desta elevada taxa de ventilação é que durante 60% do tempo diário, durante os meses em estudo, este cenário apresenta valores de temperatura interior inferiores a 14 °C, na sala;
- Os cenários que apresentam menor ventilação coincidem com os cenários onde não existe ventilação mecânica. Estes são os cenários onde se observam maiores valores de concentração de dióxido de carbono e maiores valores de humidade relativa, como seria de prever.



# 6

## CONCLUSÕES

### 6.1. CONCLUSÕES GERAIS DO TRABALHO

Uma vez atingidos todos os objetivos propostos no capítulo 1, neste capítulo pretende-se resumir as principais conclusões obtidas no decorrer do trabalho desenvolvido. Para cada objetivo parcial são especificadas as conclusões retiradas.

O primeiro objetivo parcial definido consistia na implementação da modelação disponível no EnergyPlus na simulação higrotérmica de um apartamento T3. As principais conclusões retiradas para este objetivo são:

- A ferramenta utilizada para simular o comportamento higrotérmico do modelo estudado foi o EnergyPlus, que consiste num programa de simulação energética com enormes potencialidades. Permite realizar uma modelação detalhada de um edifício, bem como caracterizar o seu tipo de utilização. Recorrendo ao programa desenvolveu-se um modelo de uma habitação real, situada na cidade do Porto;
- Para o cálculo do comportamento higrotérmico do apartamento utilizaram-se os modelos EMPD e HAMT do programa. Sendo o modelo HAMT mais complexo e detalhado que o modelo EMPD, proporciona resultados mais fidedignos e pormenorizados. Considerando que inicialmente os modelos desenvolvidos estão sujeitos a um regime de ventilação constante, compararam-se os resultados de ambos para testar a fiabilidade dos resultados do modelo EMPD. Verificou-se que resultados são satisfatórios, não existindo grandes diferenças entre os valores provenientes dos dois modelos. A diferença entre os valores médios de cada modelo, quer para a temperatura interior quer para a temperatura ponto de orvalho, não ultrapassa 1 °C. Realizou-se ainda a comparação dos resultados provenientes da presente dissertação com os resultados de uma dissertação [11] semelhante, tendo-se verificado valores semelhantes em ambos os trabalhos. A maior diferença percentual para a temperatura interior ocorre entre os modelos EMPD e é de 0,066%. Para a temperatura ponto de orvalho a diferença percentual é igual para ambos os modelos e tem o valor de 0,05%;
- Com base no modelo EMPD desenvolvido, após se verificar que apresenta resultados adequados, integrou-se o modelo AirflowNetwork tentando tornar deste modo, a simulação mais realista. Através do AirflowNetwork implementou-se um sistema de ventilação multi-zona, que consiste num método de descrição dos fluxos de ar num edifício. Este método relaciona os vários compartimentos, simulando-se assim uma interação entre as diversas zonas existentes da habitação. Assim sendo, permite estudar regimes variáveis de ventilação tendo em conta a interação entre zonas, sendo este o principal objetivo da presente dissertação. Concluindo, através deste novo modelo desenvolvido é possível, com base em fenómenos

meteorológicos e equipamentos mecânicos, simular de forma adequada regimes de ventilação num edifício;

- De salientar ainda a reduzida precisão do AirflowNetwork em simular a ação do vento, devido aos dados provenientes do ficheiro climático utilizados pelo programa terem uma frequência horária. Como consequência os valores de Rph verificados ao longo deste trabalho, provenientes da ação do vento, são sensivelmente mais reduzidos dos que seriam de esperar.

As principais conclusões na análise de sensibilidade realizada ao modelo AirflowNetwork são:

- No estudo realizado sobre a influência das áreas das grelhas, não considerando qualquer equipamento mecânico de extração de ar, verificou-se que quanto maior a área da grelha maior o caudal de admissão de ar, como seria de prever. Neste mesmo estudo numa das situações aumentou-se a área de uma das grelhas da habitação e verificou-se uma alteração em alguns sentidos dos fluxos de ar na habitação. Conclui-se assim, que a área das grelhas é uma importante componente num sistema de ventilação de um edifício e pode condicionar as direções dos fluxos de ar;
- Observou-se que a ventilação mecânica tem grande influência nos caudais de infiltração, quando se está a variar a área das grelhas. A ventilação mecânica condiciona a admissão de ar numa habitação, onde o aumento da área das grelhas nesta situação não faz variar de forma linear o caudal de admissão de ar, como no ponto anterior da análise de sensibilidade. Até um determinado aumento da área das grelhas verifica-se o consequente aumento do caudal de admissão de ar, porém a partir de determinado aumento da área, deixa de se verificar um aumento no caudal de admissão. Assim sendo, a implementação da ventilação mecânica neste caso, tem consequências negativas, condicionando o caudal de infiltração da habitação;
- No estudo dos coeficientes de pressão do vento, não se observaram diferenças relevantes nos parâmetros higrotérmicos estudados para os vários coeficientes simulados. Constata-se que os coeficientes de pressão do vento, para o caso em estudo, não condicionam de forma relevante a ventilação da habitação;
- Ao estudar a influência da permeabilidade das janelas no modelo, observou-se que atribuindo menor permeabilidade somente às janelas das zonas de serviço, onde se situam os equipamentos mecânicos de extração de ar, conseguem-se valores de Rph superiores na habitação. Verifica-se que reduzindo a permeabilidade das janelas nos compartimentos de serviço, onde se verificam pressões negativas, ocorre menor entrada de ar através das frinchas em torno da janela, sendo o resultado um aumento de admissão de ar nas grelhas dos compartimentos principais, para compensar a diminuição de admissão de ar na habitação. Através desta alteração da permeabilidade das janelas consegue-se reduzir a concentração de CO<sub>2</sub> em 15% num quarto;
- No estudo da importância da abertura das janelas no grau de ventilação da habitação, constatou-se que através da abertura de uma janela consegue-se obter elevados caudais de admissão de ar no apartamento e deste modo, atinge-se um elevado valor de Rph. Foi ainda simulada uma situação extrema, onde se manteve todas as janelas do apartamento abertas ao longo do dia, e alcançou-se um valor de Rph médio diário de cerca de 13,5 h<sup>-1</sup>;
- Após a análise de sensibilidade realizou-se uma comparação entre o modelo AirflowNetwork desenvolvido e um modelo com ventilação constante (Rph de 1h<sup>-1</sup>). Os parâmetros estudados foram a concentração de dióxido de carbono, a produção de vapor, a temperatura interior e a humidade relativa. Como modelo AirflowNetwork foi desenvolvido com base num caso real, ele possui algumas limitações, o que levou à existência de reduzidos valores de Rph, sendo



que o valor de  $Rph_{med}$  é de cerca de  $0,31\ h^{-1}$ . Devido à diferença entre os valores de renovações horárias nos dois modelos, o modelo com ventilação constante apresenta no geral melhores resultados. Concluiu-se que o modelo AirflowNetwork desenvolvido possui um sistema de ventilação deficiente e como melhoria sugeria-se a abertura das janelas durante um período matinal e a implementação de um exaustor na cozinha com maior caudal de extração. O grande objetivo seria através destas alterações alcançar valores de renovações de ar por hora mais apropriados, de  $1h^{-1}$  para os compartimentos principais e  $4h^{-1}$  para os compartimentos de serviço.

Na avaliação do desempenho do apartamento para um conjunto de cenários desenvolvidos retiraram-se as seguintes conclusões:

- A opção de apenas considerar apenas um horário para todos os dias da semana, não tendo em conta que os hábitos dos moradores se alteram durante o fim-de-semana, é uma simplificação aparentemente aceitável, devido à semelhança entre os resultados obtidos;
- A sala é o compartimento mais afetado pelo funcionamento do exaustor da zona 3. Um corte da ventilação mecânica na zona 3 origina uma redução de cerca de 60% do valor de  $Rph$  da sala;
- A abertura das janelas durante um curto período matinal implica uma melhor ventilação da habitação, como já se tinha verificado na análise de sensibilidade. Consequentemente existe uma melhoria significativa da qualidade do ar. Porém, através da abertura das janelas verifica-se também um aumento da influência do ambiente exterior no comportamento higrotérmico da habitação, tornando-se assim mais difícil manter os níveis de conforto adequados. Conclui-se portanto que à medida que se aumentam as taxas de renovação horária de ar de um edifício, maior é a influência da temperatura exterior no mesmo.

## **6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Na sequência do trabalho realizado na presente dissertação, seria interessante desenvolver uma ferramenta de otimização de regimes variáveis de ventilação, procurando conciliar três importantes temas relacionados com a ventilação de uma habitação, que são: a qualidade do ar, o conforto dos ocupantes e a minimização de gastos de energia.

Existe ainda espaço para melhorias no modelo simulado, relativamente à implementação do AirflowNetwork, onde se encontraram alguns obstáculos.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Fraguito, J. *Políticas de Habitação: Implementação e avaliação de programas de habitação na cidade do Porto*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2009.
- [2] Matos, F. *A situação do parque habitacional do Grande Porto na década de 80*. Revista da Faculdade de Letras – Geografia I, Vol. IX, 1993, páginas 5 – 16, Porto.
- [3] Pinto, J. *Avaliação do comportamento higrotérmico de uma habitação através de medições “In Situ”*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2009.
- [4] Freitas, V. *Recomendações Práticas para Implementação de Sistemas de Ventilação Mistos em Edifícios de Habitação*. Documento consultado a partir dos conteúdos da disciplina de Patologia e Reabilitação de Edifícios.
- [5] Tiernan, M. *The Comfort Zone*. Commercial Modular Costruction, Janeiro de 1998.
- [6] CEN - Eurocódigo 1- *Modelação da Ação do vento*. Parte2, Anexo I. EN 1991-1-4
- [7] Verdelho, S. *Avaliação do Potencial de Arrefecimento de Edifícios Através de Ventilação Natural*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2008.
- [8] Melo, M., Lamberts, R., Versage, R., Sorgato, M. *Manual de simulação de edifícios naturalmente ventilados no programa EnergyPlus*. Agosto, 2008, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Florianópolis.
- [9] EnergyPlus, *Getting Started with Energyplus in EnergyPlus Documentation Menu*. Outubro, 2011
- [10] Rodrigues, A., Piedade, A., Roriz, L. *Climatização em edifícios envolvente e comportamento térmico*, Edições Orion, Amadora, 2003.
- [11] Costa, H. *Influencia do regime de ventilação no comportamento higrotérmico de habitações sem aquecimento contínuo*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2012.
- [12] EnergyPlus, *Engineering References in EnergyPlus Documentation Menu*. Outubro, 2011
- [13] Dutton, S., Shao, L., Riffat, S. *Validation and parametric analysis of EnergyPlus: AirflowNetwork model using CONTAM*. Third National Conference of IBPSA-USA, 01/08/2008, Berkeley, California.
- [14] Afonso, M. *Simulação Higrotérmica de Edifícios: Aplicação do EMPD no cálculo da humidade interior*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2011.
- [15] Gu, L. *AirflowNetwork Modeling in EnergyPlus*. 10<sup>th</sup> International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition on September 3-6, 2007, Beijing
- [16] Amaral, M. *Sistemas de ventilação natural e mistos em edifícios de habitação*. Dissertação de Doutoramento, FEUP, 2008.
- [17] EnergyPlus, *Input Output Reference in EnergyPlus Documentation Menu*. Outubro, 2011
- [18] LIPOR, *Diagnóstico de Sustentabilidade Lordelo do Ouro*, Agenda 21, julho 2009
- [19] Site do Instituto Nacional de Meteorologia (endereço: <http://www.meteo.pt/pt/oclima/normais.clima/1981-2010/014/>)
- [20] NP1037 -1 *Ventilação e evacuação dos produtos da combustão dos locais com aparelhos a gás, Parte 1 : Edifícios de habitação, ventilação natural*. Instituto Português da Qualidade. Portugal

- [21] Ferreira, M., *Caudais de ventilação recomendados para edifícios residenciais: Impacto ao Nível do Conforto Térmico e do Consumo de Energia para Aquecimento*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2004.
- [22] Cengel, Y., Boles, M. *Termodinâmica*. Mc-Graw-Hill 2007.
- [23] Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE), Decreto de lei nº79-2006, Diário da Republica 1ª série - A, 4 de abril 2006.
- [24] Freitas, V., Pinto, P., *Nota de Informação Técnica 002, Permeabilidade ao vapor de materiais de construção, condensações internas*. LFC, 1998.